

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica**



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Mejoramiento de los procesos en minería, mediante la  
implementación de soluciones tecnológicas con enfoque Six  
Sigma**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Armando Oliver Moyonero Jordan

 [0009-0001-5095-4684](https://orcid.org/0009-0001-5095-4684)

Asesor

M.Sc. Jose Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2025

---

Citar/How to cite	Moyonero Jordan [1]
Referencia/Reference	[1] A. Moyonero Jordan, " <i>Mejoramiento de los procesos en minería, mediante la implementación de soluciones tecnológicas con enfoque Six Sigma</i> " [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---



---

Citar/How to cite	( Moyonero, 2025)
Referencia/Reference	Moyonero, A. (2025). <i>Mejoramiento de los procesos en minería, mediante la implementación de soluciones tecnológicas con enfoque Six Sigma</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

***Dedicatoria***

*A Claudia, mi compañera de vida. A mis hijos: Marcelo,  
Valentina y Santiago, por ser mi inspiración en cada  
momento de mi vida.*

*Les dedico este trabajo como muestra de amor y  
reconocimiento*

*Que este logro va para renovar mi compromiso con ustedes  
siempre.*

*Los amo siempre.*

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Claudia, mi amiga, compañera y esposa. A mis hijos Marcelo, Valentina y Santiago por ser mi inspiración y fuente de resiliencia para seguir adelante. Gracias por acompañarme siempre, por alentarme y darme fuerzas en momentos difíciles.

Nada de lo logrado tendría sentido sin ustedes.

Con todo mi amor les dedico este logro.

## Resumen

El presente trabajo de investigación titulado “Optimización de procesos en minería, mediante la implementación de soluciones tecnológicas” tuvo como objetivo reducir el tiempo de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de la flota Komatsu a un máximo de 3 horas, asegurando al mismo tiempo la seguridad operacional y mejorando la disponibilidad de los equipos. La hipótesis planteada sostiene que la incorporación de soluciones tecnológicas en este proceso permitiría alcanzar dicho tiempo objetivo sin comprometer la integridad operativa.

Para lograr estos resultados, se aplicó la metodología Six Sigma, siguiendo el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), lo cual permitió identificar las causas raíz de las demoras, estandarizar el proceso y validar mejoras sostenibles. El uso de herramientas estadísticas, estudios de variabilidad y análisis de desempeño fueron claves para guiar la toma de decisiones basada en datos.

Como resultado, se logró reducir el tiempo promedio de cambio de llantas a 3.1 horas, un valor muy cercano al objetivo de 3.0 horas y significativamente inferior a los valores históricos, los cuales superaban las 5 horas sin intervención. Esta mejora tuvo un impacto directo en la disponibilidad operativa de la flota, sin afectar la seguridad del personal.

Además, se estimó —según el 5YP 2015— un beneficio financiero potencial anual de US\$ 6'180,392, derivado del incremento en la disponibilidad de camiones. Esto demuestra el valor económico y estratégico de aplicar tecnología junto con metodologías de mejora continua como Six Sigma.

Finalmente, el proyecto generó un modelo escalable y replicable para otros procesos de mantenimiento o logística minera, fortaleciendo una cultura organizacional de eficiencia y calidad operativa.

Palabras clave — Optimización de procesos, Six Sigma, DMAIC, cambio de llantas, mejora continua.

## **Abstract**

The present research project, titled “Process Optimization in Mining through the Implementation of Technological Solutions”, aimed to reduce the tire change time for positions 3-4 and 5-6 of the Komatsu fleet to a maximum of 3 hours, while ensuring operational safety and improving equipment availability. The proposed hypothesis stated that the incorporation of technological solutions in this process would allow achieving the target time without compromising operational integrity.

To achieve these results, the Six Sigma methodology was applied, following the DMAIC cycle (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control), which made it possible to identify root causes of delays, standardize the process, and validate sustainable improvements. The use of statistical tools, variability studies, and performance analysis were key to guiding data-driven decision-making.

As a result, the average tire change time was reduced to 3.1 hours, a value very close to the 3.0-hour target and significantly lower than historical figures, which consistently exceeded 5 hours without intervention. This improvement had a direct impact on the operational availability of the fleet, without compromising personnel safety.

In addition, according to estimates from the 5YP 2015, a potential annual financial benefit of US\$ 6,180,392 was calculated, derived from the increased availability of trucks. This demonstrates the economic and strategic value of applying technology alongside continuous improvement methodologies such as Six Sigma.

Finally, the project generated a scalable and replicable model for other maintenance or mining logistics processes, strengthening an organizational culture focused on efficiency and operational quality.

**Keywords** — Process optimization, Six Sigma, DMAIC, tire change, continuous improvement.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción .....	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Descripción del problema de investigación .....	2
1.3 Objetivo .....	3
1.4 Hipótesis .....	3
1.5 Variables .....	3
1.5.1 Variable independiente (V.I) .....	3
1.5.2 Variable dependiente (V.D) .....	3
1.6 Antecedentes referenciales .....	4
1.6.1 Antecedentes internacionales.....	4
1.6.2 Antecedentes nacionales .....	6
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	9
2.1 Marco teórico.....	9
2.1.1 Modelado estadístico.....	9
2.1.2 Calidad y confiabilidad.....	14
2.1.3 Mejora de procesos .....	22
2.1.4 Six Sigma .....	24
2.2 Marco conceptual .....	32
2.2.1 Capacidad .....	32
2.2.2 Confiabilidad.....	32
2.2.3 Desperdicio .....	32
2.2.4 DMAIC.....	32
2.2.5 Lean .....	33

2.2.6	Llantas.....	33
2.2.7	Mantenimiento.....	33
2.2.8	Optimización.....	33
2.2.9	Six-Sigma.....	33
2.2.10	Variación .....	33
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....		34
3.1	Recolección de datos .....	34
3.1.1	Unidad de estudio .....	34
3.1.2	Six Sigma – etapa Definir .....	39
3.2	Procesamiento de la información.....	47
3.2.1	Six Sigma – etapa medir .....	47
3.2.2	Six Sigma – etapa analizar .....	52
3.2.3	Six Sigma – etapa mejorar .....	56
3.2.4	Six Sigma – etapa controlar.....	62
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados .....		68
4.1	Evaluación de resultados .....	68
4.2	Evaluación económica.....	69
4.3	Validación de hipótesis.....	71
Conclusiones .....		74
Recomendaciones .....		75
Referencias bibliográficas .....		76
Anexos .....		79

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	4
Tabla 2 : Diferencias entre Cp y Cpk .....	20
Tabla 3 : Implicancias del Índice de capacidad del proceso (Cpk) .....	27
Tabla 4 : SMED del proceso .....	50
Tabla 5 : Identificación de desperdicios del proceso .....	51
Tabla 6 : Validación de causas raíz de los desperdicios del proceso .....	56
Tabla 7 : Ideas propuestas para mejora del proceso.....	57
Tabla 8 : Ideas propuestas para mejora del proceso.....	58
Tabla 9 : Costo del nitrógeno por volumen requerido.....	59
Tabla 10: Just Do It – beneficio económico.....	61
Tabla 11: Plan de entrenamiento para mejorar el proceso.....	64
Tabla 12: Resumen de tiempos promedio por cambio de llantas posición 3-4 y 5-6 .....	68
Tabla 13: Beneficio económico obtenido por las mejoras del proceso .....	70

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Funciones de densidad de probabilidad normal .....	9
Figura 2 : Funciones de densidad de probabilidad log-normal .....	10
Figura 3 : Función de densidad de probabilidad para cinco componentes del motor.....	12
Figura 4 : Característica de calidad de tres sigma .....	15
Figura 5 : Característica de calidad de tres sigma con desplazamiento .....	16
Figura 6 : Buena calidad y mala calidad.....	16
Figura 7 : Característica de calidad de seis sigma con desplazamiento.....	17
Figura 8 : Mapa de ubicación del proyecto minero.....	34
Figura 9 : Geología regional del yacimiento .....	36
Figura 10: Geología local del yacimiento .....	37
Figura 11: Sección geológica que muestra las alteraciones.....	39
Figura 12: Tiempo de cambio de llantas – línea base .....	41
Figura 13: Tiempo parcial de cambio de llantas .....	43
Figura 14: Número de incidentes – periodo 2013 / 2014.....	43
Figura 15: SIPOC – cambio de llantas posición 3-4 y 5-6 en camiones Komatsu .....	45
Figura 16: Mapa del proceso de cambio de llantas posición 3-4 y 5-6 .....	48
Figura 17: Diagrama de Spaghetti del proceso .....	49
Figura 18: Comparación de tiempos por cambio de llantas usando Smart Wheel.....	53
Figura 19: Diagrama de Ishikawa – demora en eliminar aire en las llantas .....	54
Figura 20: Diagrama de Ishikawa – demora en retiro del botapiedras para cambio de llantas.....	55
Figura 21: Test for Equal Variances.....	66
Figura 22: Comparación de varianzas de las muestras.....	67
Figura 23: Demostración grafica de la mejora del proceso .....	67
Figura 24: Tiempos promedio por cambio de llantas posición 3-4 y 5-6.....	69
Figura 25: Prueba de normalidad de TToT_Sin_SW (Linea Base).....	71

Figura 26: Prueba de normalidad de TToT_Con_SW (Mejora) .....	72
Figura 27: Prueba t pareada .....	72

# Introducción

La industria minera moderna se enfrenta al reto constante de maximizar su eficiencia operativa sin comprometer la seguridad ni la calidad del servicio. En este contexto, la optimización de procesos mediante la implementación de soluciones tecnológicas se presenta como una estrategia clave para reducir tiempos improductivos, mejorar la disponibilidad de equipos críticos y generar impactos financieros sostenibles.

Con el fin de desarrollar de manera ordenada esta investigación, el documento se organiza en cuatro capítulos principales, además de secciones complementarias de conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas. A continuación, se describe la distribución del contenido:

Capítulo I: Parte introductoria del trabajo: Este capítulo establece el contexto general y el enfoque del estudio. Se abordan las generalidades, la descripción del problema de investigación, así como el objetivo, la hipótesis, y las variables involucradas, diferenciando entre variable independiente y dependiente. Finalmente, se presentan los antecedentes referenciales, tanto a nivel nacional como internacional, que sustentan la relevancia y actualidad del tema.

Capítulo II: Marcos teórico y conceptual: Se desarrollan los fundamentos teóricos que respaldan la investigación. Se incluyen temas como el modelado estadístico, conceptos de calidad y confiabilidad, estrategias de mejora de procesos, y una revisión detallada de la metodología Six Sigma. A su vez, se incorpora un marco conceptual que clarifica los términos clave utilizados a lo largo del trabajo.

Capítulo III: Desarrollo del trabajo de investigación: Este capítulo describe la ejecución práctica del proyecto. Inicia con la recolección de datos, detallando la unidad de estudio y la etapa "Definir" de Six Sigma. Posteriormente, se abordan las fases restantes del ciclo DMAIC: medir, analizar, mejorar y controlar, mostrando cómo se aplicó cada una para transformar el proceso investigado.

Capítulo IV: Análisis y discusión de resultados: Aquí se presentan y analizan los resultados obtenidos. Se realiza la validación de la hipótesis, contrastando los datos recolectados con los objetivos planteados. Además, se incluye una evaluación económica que estima el beneficio financiero derivado de la optimización del proceso, consolidando así la propuesta desde una perspectiva técnica y de negocio.

El trabajo concluye con una sección de conclusiones, donde se sintetizan los hallazgos principales, seguida de recomendaciones prácticas para la sostenibilidad y escalabilidad del modelo propuesto. Finalmente, se incluyen las referencias bibliográficas que respaldan teóricamente el estudio.

# Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

## 1.1 Generalidades

La industria minera se caracteriza por la ejecución de operaciones a gran escala, en entornos geográficos complejos y con altas exigencias en términos de continuidad operativa. En este contexto, los equipos de acarreo desempeñan un rol esencial dentro del sistema de producción, siendo responsables del transporte continuo de material desde los frentes de trabajo hasta las plantas de procesamiento o zonas de descarga.

Los camiones de acarreo de clase ultra, ampliamente utilizados en minería a cielo abierto, están diseñados para operar bajo condiciones extremas de carga, terreno y clima. En este tipo de vehículos, los neumáticos representan uno de los componentes más relevantes tanto por su función operativa como por su incidencia en la seguridad, la disponibilidad y la eficiencia del transporte minero. Su diseño, dimensiones, materiales de fabricación y características técnicas están orientados a soportar cargas que superan varias decenas de toneladas, mantener tracción en superficies irregulares y resistir altas temperaturas y abrasión.

El conjunto de neumáticos mineros, también conocidos como OTR (Off-The-Road), constituye una parte fundamental en la ingeniería del equipo, ya que incide directamente en el rendimiento del camión, el consumo de combustible, la estabilidad en ruta y la capacidad de carga. Además, su ciclo de vida está estrechamente vinculado a variables operativas como la topografía del terreno, los hábitos de conducción, las condiciones de la vía y los parámetros de mantenimiento aplicados.

Dada la magnitud y valor económico de cada llanta, así como su influencia en el desempeño del equipo, la gestión integral de neumáticos en minería ha cobrado un papel relevante dentro de las estrategias de operación y mantenimiento. Esto abarca desde la selección técnica del modelo adecuado hasta la planificación de inspecciones, rotaciones, recambios y trazabilidad de uso, aspectos que permiten asegurar una operación sostenida y alineada con los objetivos de producción.

En resumen, las llantas en minería no solo son un insumo operativo de alto valor, sino un elemento estratégico dentro de la cadena de transporte, cuya adecuada administración y desempeño tienen repercusiones directas en la eficiencia de los procesos extractivos.

## **1.2 Descripción del problema de investigación**

En el contexto de la minería a gran escala, la eficiencia operativa y la disponibilidad de los equipos de acarreo representan factores críticos para la sostenibilidad y competitividad de las operaciones. Dentro de los objetivos estratégicos del área de Mantenimiento Mina, uno de los indicadores clave es el incremento en la disponibilidad mecánica de la flota de camiones de acarreo, dado su impacto directo en la continuidad de la producción y en la reducción de costos operativos asociados a paradas no programadas.

A mediados del año 2013, se detectó una brecha operativa significativa relacionada con los tiempos de cambio de llantas de camiones mineros, en particular en unidades de la marca Komatsu. Un análisis comparativo entre operaciones similares reveló que los tiempos de cambio para las posiciones de neumáticos 3-4 y 5-6 eran notoriamente superiores a los estándares observados en otras unidades mineras del mismo perfil. Este hallazgo puso en evidencia una ineficiencia recurrente que impacta negativamente la disponibilidad de la flota, aumentando el tiempo fuera de servicio de los equipos y generando costos adicionales por mano de obra prolongada, inmovilización de recursos logísticos y pérdida de productividad.

El problema se agrava por la naturaleza crítica de estos vehículos dentro del ciclo de acarreo, donde cualquier retraso en su mantenimiento correctivo o preventivo –como lo es el reemplazo de neumáticos– genera un efecto dominó en el rendimiento general del sistema de transporte del mineral. Además, se identificó una falta de estandarización en los tiempos de atención de este tipo de mantenimientos, así como variabilidad en la ejecución de los procedimientos, lo que evidencia debilidades tanto en la gestión del conocimiento técnico como en la coordinación operacional.

En síntesis, la situación actual presenta un escenario en el que los tiempos excesivos y poco competitivos de cambio de llantas comprometen los objetivos estratégicos de disponibilidad, reducen la eficiencia global del proceso productivo y aumentan los costos asociados a la operación minera. Este problema requiere una intervención estructurada y con base técnica para ser abordado con la rigurosidad que exige el entorno de alta exigencia operativa en minería. Por lo que se plantea el siguiente problema.

¿En qué medida la inadecuada gestión de procesos de mantenimiento impacta en los elevados tiempos de cambio de llantas en camiones Komatsu?

### **1.3 Objetivo**

Reducir el tiempo de cambio de llantas posiciones 3-4 y 5-6 de la flota Komatsu a 3 horas, sin afectar la seguridad y mejorando la disponibilidad.

### **1.4 Hipótesis**

La implementación de soluciones tecnológicas en el proceso de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones Komatsu permitirá reducir el tiempo de ejecución a 3 horas.

### **1.5 Variables**

#### ***1.5.1 Variable independiente (V.I)***

**X: Soluciones tecnológicas.**

- Six Sigma.

#### ***1.5.2 Variable dependiente (V.D)***

**Y: Llantas**

- Tiempo de cambio de llantas (horas).

**Tabla 1***Matriz de consistencia*

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE		INDICADORES
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>			
¿En qué medida la inadecuada gestión de procesos de mantenimiento impacta en los elevados tiempos de cambio de llantas en camiones Komatsu?	Reducir el tiempo de cambio de llantas posiciones 3-4 y 5-6 de la flota Komatsu a 3 horas, sin afectar la seguridad y mejorando la disponibilidad.	La implementación de soluciones tecnológicas en el proceso de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones Komatsu permitirá reducir el tiempo de ejecución a 3 horas.	X: Independiente / Causa  . Soluciones tecnológicas.	Y: Dependiente / Efecto  Llantas	Tiempo de cambio de llantas (3.1 horas).

Fuente: Elaboración propia

**1.6 Antecedentes referenciales****1.6.1 Antecedentes internacionales**

Alsubaie, B. H. (2016). Optimization oriented lean six sigma development for maintenance optimization in fleet vehicles. Esta tesis de maestría, elaborada en Brunel University (Londres), se enfocó en el desarrollo de un modelo integral para la optimización de procesos de mantenimiento en flotas pesadas, incluyendo camiones de uso minero, mediante la integración de metodologías Lean y Six Sigma con técnicas de optimización matemática. El objetivo principal fue reducir los tiempos de inactividad operativa y aumentar la eficiencia de los recursos de mantenimiento a través de un modelo que combine análisis estadístico, simulaciones operativas y toma de decisiones basadas en datos. Se aplicó el ciclo DMAIC para identificar desperdicios, analizar causas raíz de ineficiencias en mantenimientos preventivos y correctivos, y diseñar estrategias de mejora sostenibles. El modelo propuesto fue validado en un entorno simulado, mostrando mejoras significativas: reducción del 20 % en los tiempos promedio de mantenimiento, aumento en la utilización del personal técnico, y mejora del 15 % en la disponibilidad operativa de los vehículos. Además, se logró optimizar la asignación de tareas, reduciendo conflictos de programación y mejorando los indicadores clave de mantenimiento. La investigación

concluye que el enfoque Lean Six Sigma no solo mejora la calidad del servicio de mantenimiento, sino que también tiene un impacto directo en la rentabilidad y continuidad operativa de empresas con flotas críticas.

Hia, S.W. et al (2024). The application of lean six sigma to improve mining transportation overall vehicle effectiveness (MTOVE): a case study in mining company. En esta investigación se presenta un estudio de caso realizado en una operación minera, con el objetivo de aplicar la metodología Lean Six Sigma para mejorar el indicador MTOVE (Mining Transportation Overall Vehicle Effectiveness), diseñado para evaluar el desempeño global de los vehículos de acarreo utilizados en minería. El estudio integró herramientas del enfoque DMAIC con indicadores como disponibilidad, utilización y rendimiento de flota, y se recopiló datos operacionales durante tres meses en una mina a cielo abierto. Mediante el uso de diagramas de Pareto, pruebas ANOVA, análisis de tiempos y control estadístico de procesos, los investigadores identificaron pérdidas operativas asociadas a tiempos improductivos, mantenimientos no planificados y tiempos excesivos en tareas auxiliares como el cambio de llantas. Como resultado, se logró una mejora del 35 % en el valor del indicador MTOVE, así como un incremento del 17 % en la productividad y del 9 % en la utilización de flota. Estos resultados reflejan una reducción significativa en la variabilidad del proceso de transporte minero, y validan el uso de Lean Six Sigma como una herramienta efectiva para aumentar la eficiencia operativa en contextos extractivos altamente demandantes.

Hia, S.W., & Singgih, M.L. (2025). Improving tire lifespan using the six-sigma approach: a case study in a coal-hauling company. Este estudio se desarrolló en una empresa contratista de transporte de carbón en Indonesia y tuvo como propósito central aplicar la metodología Six Sigma para aumentar la vida útil de las llantas de los camiones de acarreo, una variable crítica en la operación minera debido a los altos costos de los neumáticos y su impacto directo en la disponibilidad operativa. Mediante el enfoque estructurado del ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), los autores identificaron las causas principales del desgaste acelerado de los neumáticos, tales como

sobrecarga, presión inadecuada y procedimientos de operación no estandarizados. Para ello, se utilizaron herramientas como el diagrama causa-efecto, análisis de Pareto y evaluación de procesos. El proyecto logró su objetivo de incrementar la eficiencia operacional, obteniendo como resultado un incremento del 27 % en la vida útil de las llantas, pasando de un promedio de 56,065 km antes del proyecto a 73,093 km después de la implementación de mejoras. Este avance no solo generó un ahorro económico importante, sino que también mejoró la seguridad y la planificación del mantenimiento, demostrando la eficacia del enfoque Six Sigma para optimizar componentes críticos del sistema de acarreo minero.

### **1.6.2 Antecedentes nacionales**

Coronado, R. S. & Gálvez, M. (2023). Aplicación de Six Sigma para la mejora de la productividad del área de mantenimiento de una empresa minera, Ica. Esta investigación se llevó a cabo en una empresa minera ubicada en la región Ica, Perú, y tuvo como objetivo principal evaluar el impacto de la aplicación de la metodología Six Sigma en la mejora de la productividad del área de mantenimiento, específicamente en el contexto de operaciones con maquinaria pesada como camiones mineros. Se utilizó un enfoque cuantitativo-descriptivo a través del análisis de 377 órdenes de trabajo seleccionadas de un total de 19,156 registros del año 2021. El estudio aplicó las etapas del ciclo DMAIC, enfocándose en la recolección de datos, análisis de procesos críticos, evaluación de tiempos de atención y cumplimiento de mantenimientos preventivos y correctivos. Como parte del análisis, se identificaron brechas en ejecución, acumulación de backlog y tiempos improductivos que limitaban el desempeño del área. A través de la implementación de medidas derivadas del análisis estadístico, se logró incrementar la productividad del área de mantenimiento de 73.41 % a 85.33 %, mejorar el cumplimiento de órdenes programadas en un 10.61 %, reducir en 188.07 horas las demoras en mantenimientos correctivos, disminuir el incumplimiento de mantenimiento preventivo en 67.1 %, y reducir el backlog en 13.1 %. Adicionalmente, el nivel sigma del proceso pasó de 1.16 a 4.22, lo que indica una mejora sustancial en la calidad y eficiencia operativa. Estos resultados evidencian el valor del

enfoque Six Sigma como herramienta para optimizar procesos de mantenimiento en minería y reducir costos operacionales de forma sostenible.

Indura (Grupo Air Products) (2025). Innovador sistema de inflado de neumáticos con nitrógeno en faenas mineras peruanas. Durante la feria internacional Expomin 2025, la empresa Indura (parte del Grupo Air Products) presentó una tecnología orientada a optimizar el inflado de llantas en operaciones mineras de gran altitud, como las que se desarrollan en la sierra peruana. El objetivo principal de esta innovación fue reducir significativamente el tiempo de inflado de neumáticos OTR (Off-The-Road) de camiones mineros, mejorar la eficiencia operativa y reforzar las condiciones de seguridad durante el proceso. Esta solución consiste en una planta móvil generadora de nitrógeno, que permite inflar los neumáticos en campo, eliminando la dependencia de sistemas de aire comprimido tradicionales. Como resultado, se logró disminuir el tiempo de inflado de aproximadamente 40–50 minutos a solo 15 minutos por unidad, además de obtener beneficios adicionales como una menor generación de calor dentro del neumático, menor riesgo de combustión, mayor estabilidad de presión, reducción del desgaste prematuro y ahorro energético. Estas plantas ya han sido implementadas exitosamente en faenas de gran escala en Perú, Chile y otros países de la región, y han sido validadas como una práctica segura y eficiente por fabricantes de neumáticos y equipos pesados.

Minaya, M. (2021). Implementación de la metodología Six Sigma para mejorar la vida útil de neumáticos de camiones mineros en el proyecto mina Justa. Este trabajo de investigación en la Universidad Nacional de San Agustín (Arequipa, Perú) tuvo como objetivo principal aplicar la metodología Six Sigma en la gestión de neumáticos de camiones mineros operando en el proyecto Mina Justa, con el fin de identificar las causas raíz del desgaste acelerado y mejorar su desempeño operativo. A través del ciclo DMAIC —Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar— se establecieron parámetros críticos de calidad, se midió el rendimiento actual de los neumáticos, se emplearon herramientas estadísticas como diagramas de Pareto y causa-efecto, y se implementaron acciones para optimizar el rendimiento de los neumáticos. El estudio concluyó con la implementación de

indicadores de seguimiento y una evaluación financiera que mostró una mejora en la vida útil del neumático y beneficios económicos netos para la organización, validando la efectividad de Six Sigma en la gestión de este componente crítico del transporte minero

Núñez, M. H. (2017). Análisis y propuesta de mejora en la gestión de mantenimiento de una flota de camiones mineros con la aplicación del Six Sigma. La presente tesis se desarrolló en una operación minera ubicada en la provincia de Espinar, Cuzco, dedicada a la producción de cobre, y tuvo como objetivo principal analizar y proponer mejoras en la gestión de mantenimiento de una flota de camiones mineros CAT 797F, utilizando la metodología Six Sigma como herramienta de mejora continua. Mediante la aplicación del ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), se identificaron deficiencias en la programación y ejecución del mantenimiento preventivo, así como en el control de mantenimientos correctivos. Durante la fase de medición, se registró una demora acumulada de 4 667 horas en mantenimientos preventivos y una carga adicional de 1 290 horas que no habían sido gestionadas, generando un lucro cesante estimado de 6.1 millones de dólares. El análisis permitió identificar causas raíz como la deficiente planificación, falta de estandarización de procesos y bajo cumplimiento del plan de mantenimiento. Posteriormente, se implementaron propuestas de mejora que incluyeron seguimiento con herramientas estadísticas, rediseño de flujos de programación y capacitación operativa. Los resultados reflejaron una reducción del 40 % en mantenimientos correctivos (360.9 horas menos), lo que representó un ahorro de 1.7 millones de dólares, así como una mejora significativa en la disponibilidad y confiabilidad de los camiones, consolidando la eficacia del enfoque Six Sigma en procesos críticos del mantenimiento minero.

## Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 Modelado estadístico

El modelado estadístico puede utilizarse para describir, analizar y estimar la probabilidad asociada con la falla o la vida útil de un producto. Esta subsección presenta las definiciones y conceptos básicos en el análisis estadístico y luego discute los análisis de distribuciones de probabilidad comúnmente utilizados. También se aborda brevemente el análisis de confiabilidad.

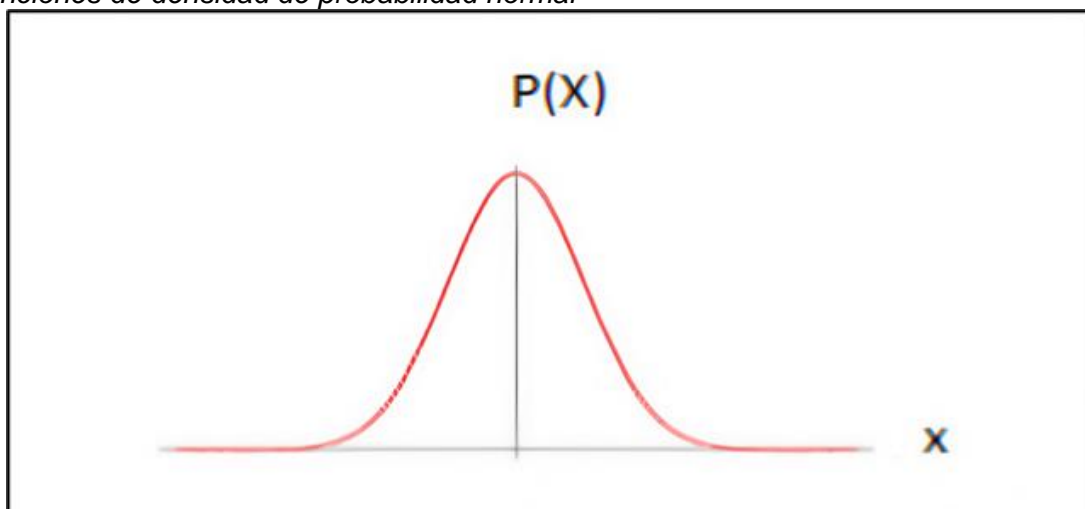
**2.1.1.1 Distribuciones de probabilidad.** Las distribuciones normal, log-normal y Weibull son las distribuciones estadísticas más importantes utilizadas. (Fuente: Fatemi et al., 2001).

**2.1.1.1.1 Distribución normal.** La distribución normal se utiliza con frecuencia para describir las dimensiones de piezas fabricadas por equipos automáticos, fenómenos físicos y biológicos naturales, y ciertos tipos de datos de vida útil. (Fuente: Nelson, 1982)

La Figura 1 muestra la densidad de probabilidad normal, la cual es simétrica con respecto a la media.

**Figura 1**

*Funciones de densidad de probabilidad normal*



Fuente: Alsubaie (2016)

La función de densidad de probabilidad normal es:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

Donde:

$\mu$  = Es la media (puede tomar cualquier valor),

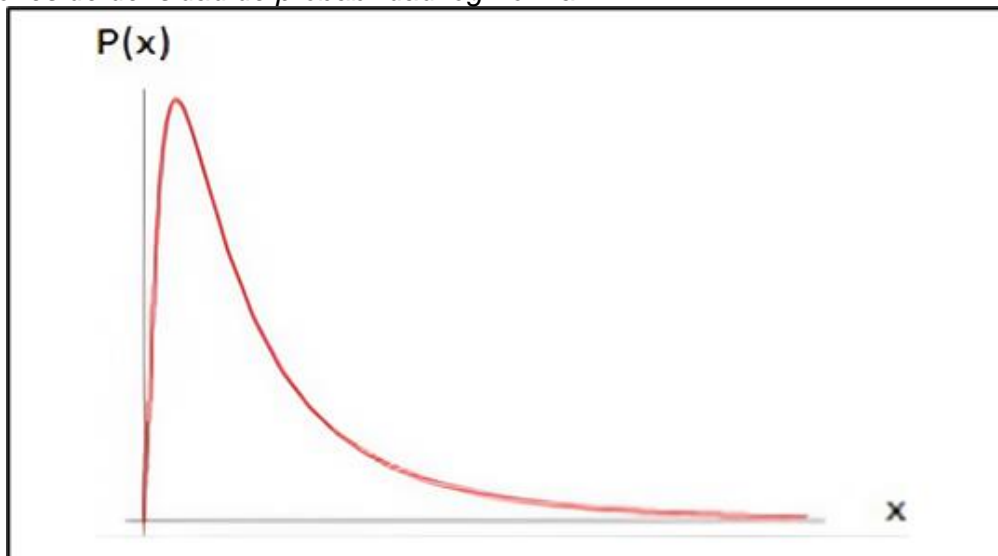
$\sigma$  = Es la desviación estándar (valor positivo).

**2.1.1.1.2 Distribución Log-Normal.** La distribución log-normal se utiliza frecuentemente para datos económicos y ciertos tipos de datos de vida útil, como la fatiga de metales y la vida útil del aislamiento eléctrico. Existe una relación entre las distribuciones log-normal y normal. (Fuente: Nelson, 1982).

La Figura 2 muestra la densidad de probabilidad log-normal.

**Figura 2**

*Funciones de densidad de probabilidad log-normal*



Fuente: Alsubaie (2016)

La función de densidad de probabilidad log-normal es:

$$P(x) = \frac{0.4343}{(2\pi^2)x\sigma} \exp\left\{-\frac{(\log(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

Donde:

0.4343 = Es igual a  $1/\ln(10)$ .

**2.1.1.1.3 Distribución de Weibull.** El modelo más utilizado en la ingeniería de confiabilidad moderna es la distribución de Weibull, denominada así por Waloddi Weibull (1951). Esta distribución se emplea ampliamente en el análisis estadístico debido a su flexibilidad y su capacidad para manejar tamaños de muestra pequeños al evaluar la vida útil de los componentes de un sistema. El análisis de Weibull es el análisis clásico de confiabilidad y ha tenido un impacto significativo en la industria automotriz. Dado que las distribuciones de Weibull y log-normal tienden a representar mejor las mediciones de vida útil de productos, ambas son conocidas como distribuciones de vida útil. (Fuente: Tabikh y Khattab, 2011).

Existen funciones de distribución de Weibull de dos y tres parámetros.

La función de densidad de probabilidad de Weibull es:

$$f(x) = (\beta/\theta^\beta)x^{\beta-1}\exp[-(x/\theta)^\beta] \quad (3)$$

donde:

- $\theta$  es el parámetro de escala, también llamado vida característica, ya que siempre representa el 63.2 %, es decir,  $100 \times (1 - e^{-1})$  de probabilidad acumulada, y tiene las mismas unidades que  $x$ .
- $\beta$  es el parámetro de forma (o pendiente), que determina la forma de la distribución.

La función de densidad reducida, conocida como distribución Weibull de dos parámetros, se utiliza comúnmente en mecánica de fractura probabilística y análisis de fatiga.

Gracias a su flexibilidad, la distribución de Weibull se utiliza frecuentemente en el campo del análisis de datos de vida. Tiene la capacidad de simular el comportamiento de otras distribuciones estadísticas, como la normal y la exponencial.

Según el valor del parámetro  $\beta$ , la tasa de fallas se interpreta como sigue:

- Si la tasa de fallas disminuye con el tiempo, entonces  $\beta < 1$ .
- Si la tasa de fallas es constante, entonces  $\beta = 1$ .
- Si la tasa de fallas aumenta con el tiempo, entonces  $\beta > 1$ .

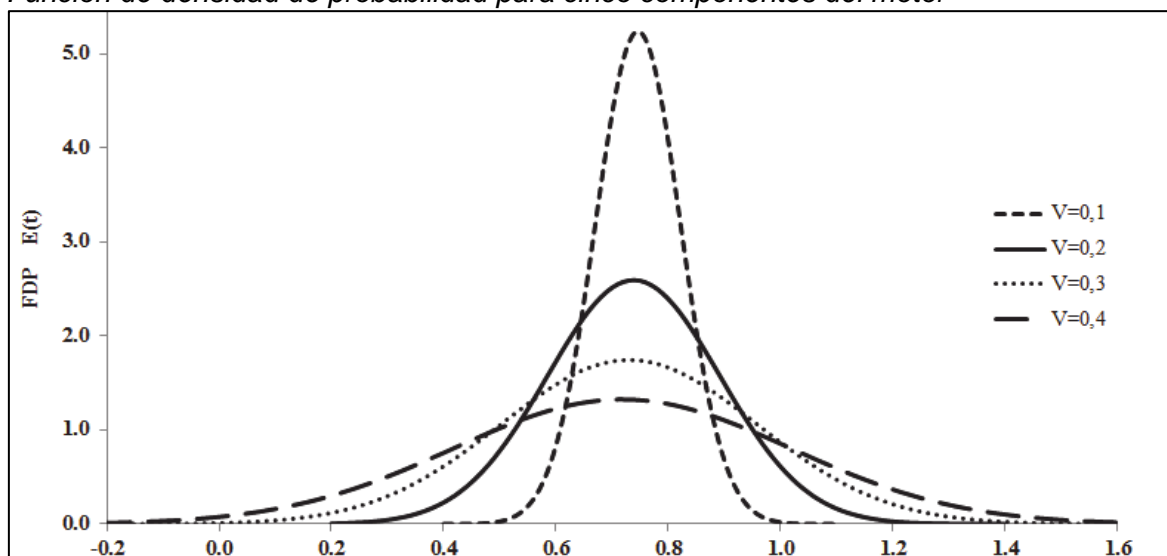
Esta interpretación de la tasa de fallas puede proporcionar información valiosa sobre las causas de dichas fallas:

- Una tasa de fallas decreciente sugiere una etapa de "mortalidad infantil", donde los fallos ocurren temprano por defectos iniciales.
- Una tasa de fallas constante indica que los fallos se deben a eventos aleatorios.
- Una tasa de fallas creciente indica un desgaste progresivo, donde los componentes son más propensos a fallar con el tiempo.

La función de densidad de Weibull puede adoptar múltiples formas. La Figura 3 muestra distintas funciones de densidad (Pascovici, 2008) correspondientes a cinco partes de un motor que tienen mayor probabilidad de fallar: la cámara de combustión, las partes con vida útil limitada (LLP), el compresor de alta presión (HPC), las fallas generales, y la turbina de alta presión (HPT).

**Figura 3**

*Función de densidad de probabilidad para cinco componentes del motor*



Fuente: Alsubaie (2016)

**2.1.1.2 Análisis de datos de confiabilidad.** Los ingenieros de confiabilidad analizan los datos de vida útil de productos con el fin de determinar la probabilidad y capacidad de que partes, componentes y sistemas cumplan sus funciones requeridas durante períodos específicos de tiempo, sin fallas, y en condiciones ambientales determinadas.

Los datos de vida útil son mediciones del tiempo de funcionamiento de los productos en el mercado, tales como el tiempo que un producto operó de manera efectiva o el tiempo transcurrido antes de que fallara. Estos datos pueden medirse en horas, millas, ciclos hasta la falla, ciclos de esfuerzo u otra unidad que permita cuantificar la duración o exposición de un producto. Existen diferentes tipos de datos de vida útil, y dado que cada tipo proporciona información específica sobre la vida del producto, el método de análisis varía según el tipo de datos. (Fuente: Nelson, 2005).

Nelson (2005) identifica dos tipos principales de datos:

**Datos completos:**

Este término se refiere a los casos en los que el valor de vida útil de cada unidad de muestra es observado (o conocido).

**Datos censurados:**

Se dividen en tres subtipos:

- Censura por la derecha (suspendidos): Unidades que no han fallado al momento de analizar los datos de vida útil.
- Censura por intervalo: Refleja incertidumbre sobre el momento exacto en que ocurrió la falla, pero se sabe que fue dentro de un intervalo determinado.
- Censura por la izquierda: El tiempo de falla solo se identifica como anterior a cierto momento.

**2.1.1.2.1 Datos de Ensayo (Test Data).** Las pruebas de vida útil en materiales o componentes que presentan alta confiabilidad requieren largos periodos de tiempo para obtener datos cuando se prueban bajo condiciones normales de uso. En estos casos, para reducir el tiempo y costo de prueba, así como para obtener una mejor comprensión de los modos de falla del producto y sus características de vida, los especialistas en confiabilidad aplican métodos que aceleran la vida útil del producto mediante la aplicación de condiciones extremas o forzadas, lo que provoca fallas más rápidamente que en condiciones normales. A esta técnica se le conoce como ensayo acelerado de vida útil.

**2.1.1.2.2 Datos de Campo (Field Data).** El análisis de datos de fallas en campo es esencial en los estudios de desempeño de confiabilidad de componentes automotrices, ya que permite capturar los perfiles reales de uso y las exposiciones ambientales combinadas que son difíciles de replicar en un laboratorio. Estos datos, por lo general, provienen de registros de mantenimiento de las empresas automotrices dentro del sector de servicios. De hecho, los datos de mantenimiento son una fuente principal de información sobre el rendimiento de los productos en uso.

El tiempo y/o kilometraje durante el cual se efectúan reparaciones a todas las fallas ocurridas en un vehículo se denomina período de mantenimiento. Por lo general, todas las reparaciones realizadas dentro de este período, cuando se atienden en concesionarios autorizados, se registran en sus respectivas bases de datos de mantenimiento. Desde una perspectiva estadística, los datos de fallas en campo extraídos de estas bases de datos automotrices se consideran datos completos.

## **2.1.2 Calidad y confiabilidad**

“la confiabilidad es calidad en el tiempo”. Esta declaración indica que tener buena calidad es necesario, pero no suficiente. Una de las principales diferencias entre calidad y confiabilidad es que la confiabilidad solo puede evaluarse directamente después de que un producto ha estado en uso durante cierto tiempo; por lo tanto, hacer una predicción precisa de la confiabilidad presenta varios desafíos técnicos. (Fuente: Condra, 1993)

**2.1.2.1 Efecto de la variabilidad.** Según Kackar (1985), la variación en el desempeño de un producto a lo largo de su vida útil es un aspecto importante de la calidad del producto. Deming (1982, p. 20) cita a Lloyd S. Nelson, quien afirma que “el problema central de la gestión en todos sus aspectos —incluidos la planificación, adquisiciones, manufactura, investigación, ventas, personal, contabilidad y derecho— es comprender mejor el significado de la variación y extraer la información contenida en ella”. Más adelante, Deming (2000, p. 202) señala que “la mejora casi siempre significa reducción de la variación” y considera el “conocimiento sobre la variación” como uno de los pilares

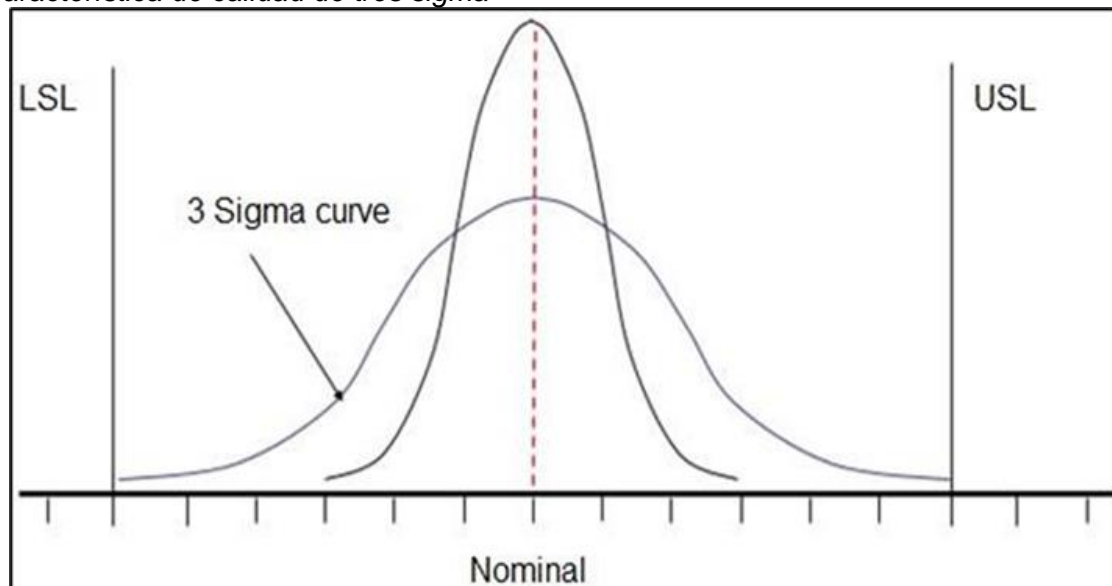
fundamentales en su sistema de conocimiento profundo, compuesto por: apreciación del sistema, conocimiento de la variación, teoría del conocimiento y psicología.

La relación entre calidad y confiabilidad se ilustra en las Figuras 4 a 7. La Figura 4 muestra un nivel de calidad apenas aceptable de tres sigma (bajo el supuesto de normalidad, este nivel de calidad implica un rendimiento del proceso del 99.73 %) respecto a una característica específica del producto.

Aunque los clientes que reciben productos cercanos al centro de la distribución podrían estar satisfechos con el rendimiento, aquellos que reciben productos cercanos a los límites de especificación probablemente no lo estén completamente. Como se ilustra en la Figura 5, con el tiempo se produce un desplazamiento causado por desgaste, cambios químicos u otras formas de degradación, lo que hace que más productos se acerquen o excedan los límites de especificación, generando problemas graves de confiabilidad.

**Figura 4**

*Característica de calidad de tres sigma*

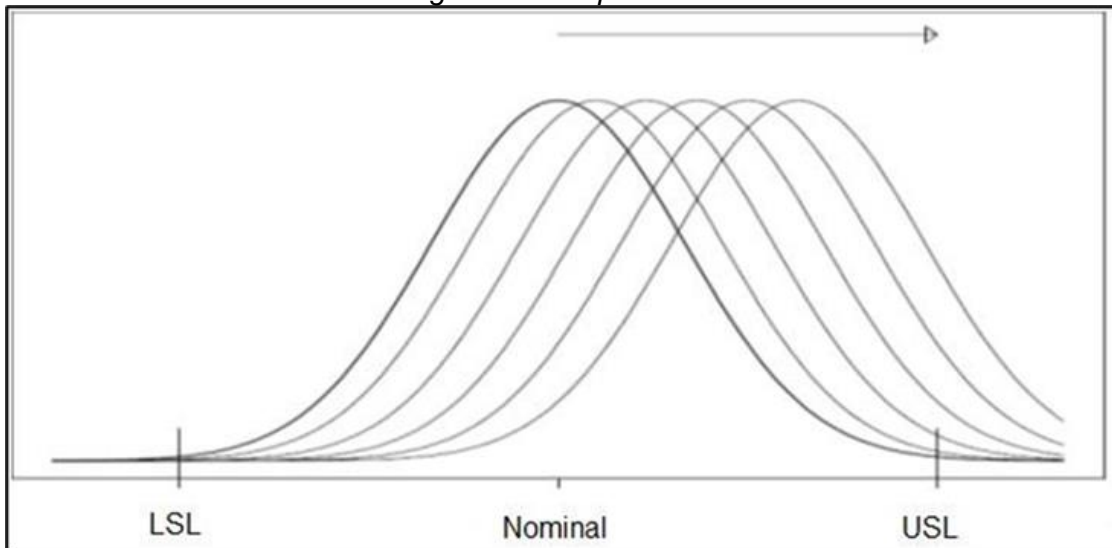


Fuente: Alsubaie (2016)

(LSL y USL hacen referencia a los límites inferior y superior de especificación, respectivamente.)

### Figura 5

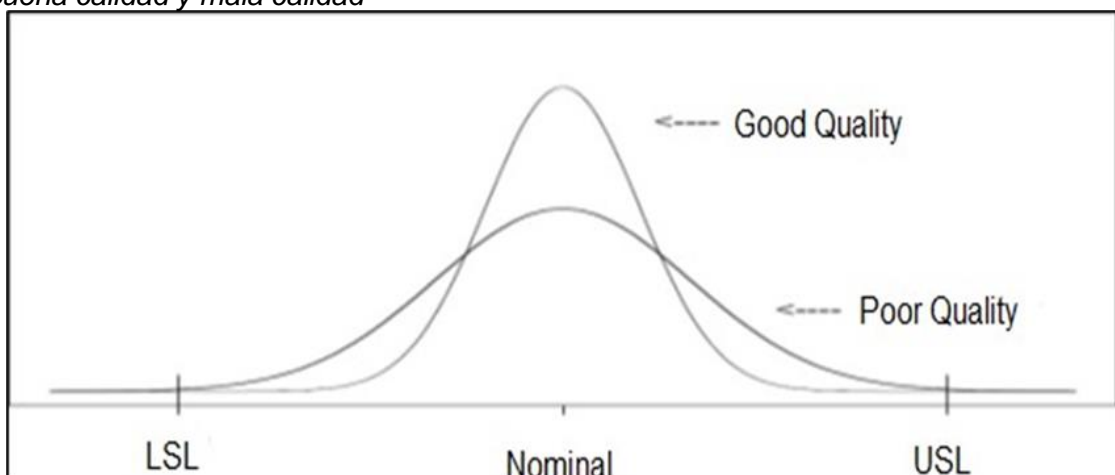
*Característica de calidad de tres sigma con desplazamiento*



Fuente: Alsubaie (2016)

### Figura 6

*Buena calidad y mala calidad*



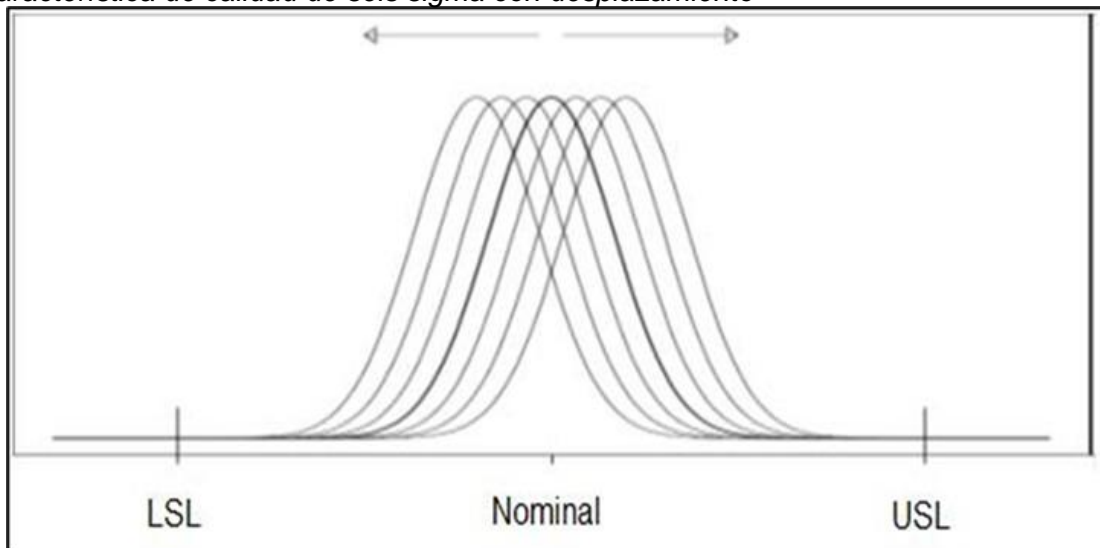
Fuente: Alsubaie (2016)

La Figura 6 compara productos de buena y mala calidad. Las Figuras 5 y 6 enfatizan que no basta con que la calidad se mantenga dentro de los límites de especificación. Una menor variabilidad significa que más productos estarán cerca del objetivo (target), y por tanto, es más probable que permanezcan dentro de los límites con el tiempo, lo que se traduce en una mayor confiabilidad. En la Figura 7, se observa que con buena calidad inicial, los productos continúan ofreciendo buen desempeño con el paso del tiempo, incluso con el desplazamiento esperado, logrando así alta confiabilidad.

De acuerdo con Meeker y Escobar (2003), suele decirse que la variabilidad es el enemigo de la calidad. Pero también lo es de la confiabilidad. Reducir la variabilidad de entrada y su transmisión hacia la variabilidad percibida por el cliente son metas fundamentales del diseño de ingeniería. Basado en ideas de experimentos estadísticamente diseñados, Taguchi (1986) propuso una metodología para mejorar el diseño de productos o procesos mediante la reducción de la transmisión de la variabilidad, conocida como diseño robusto.

### Figura 7

*Característica de calidad de seis sigma con desplazamiento*



Fuente: Alsubaie (2016)

**2.1.2.2 Diseño robusto para mejorar la confiabilidad.** Meeker y Escobar (2003) indican que el diseño robusto es un concepto importante, ampliamente conocido (al menos entre los estadísticos que trabajan en calidad), pero aún subutilizado en los ámbitos de la calidad y la confiabilidad. Definen robustez como la capacidad de un producto o proceso para desempeñar eficazmente su función prevista bajo diversas condiciones operativas y ambientales, incluyendo el desgaste a largo plazo u otras formas de degradación. La idea técnica-operativa de robustez se deriva de los aportes de Taguchi en ingeniería. A través del uso de la función de pérdida de calidad y la evaluación de la confiabilidad del rendimiento del producto, se define y gestiona comúnmente la calidad,

entendida como la probabilidad de que el producto cumpla su función sin fallas durante un tiempo determinado.

**2.1.2.3 Estimación de la varianza del proceso.** Las organizaciones siempre deben considerar el origen y la magnitud de la variabilidad. Para satisfacer los requisitos del cliente, es necesario mejorar la calidad del producto mediante la reducción de la varianza en los procesos. Menor variación en el sistema implica mejor calidad. En este sentido, la variabilidad de las características críticas para la calidad (CTQ, por sus siglas en inglés) es una medida de la uniformidad de los resultados. Si la variación es alta, también lo será el número de productos no conformes. La no conformidad (NC) se refiere a la falla en cumplir con los límites de especificación, los cuales representan las mediciones deseadas para una característica de calidad. (Fuente: Senvar y Tozan, 2010)

Específicamente, la capacidad del proceso se relaciona con la uniformidad del mismo. En este contexto, la variabilidad puede asumirse de dos maneras: una es la variabilidad inherente de una característica CTQ en un momento determinado, y la otra es su variabilidad a lo largo del tiempo. Debe tenerse en cuenta que un estudio de capacidad del proceso frecuentemente mide los parámetros funcionales o características CTQ de un producto, pero no mide el proceso en sí. La capacidad del proceso compara la variabilidad inherente con las especificaciones definidas de acuerdo con los requisitos del cliente. En otras palabras, es la proporción entre la dispersión real del proceso y la dispersión permitida, medida en unidades de seis desviaciones estándar. Para ello se utilizan índices de capacidad del proceso (PCI). (Fuente: Montgomery, 2009)

**2.1.2.3.1 Análisis de Capacidad del Proceso (PCA).** Los gráficos de control estadístico del proceso (SPC) tienen tres propósitos principales (Sauers, 1999):

- Asegurar que el proceso esté bajo control estadístico.
- Emitir alertas cuando el proceso presenta señales de estar fuera de control.
- Proporcionar la información necesaria para llevar a cabo el análisis de capacidad del proceso (PCA).

Generalmente, los gráficos  $\bar{X}$ -R y  $\bar{X}$ -S son los más utilizados. Una vez que el proceso está bajo control estadístico, se puede realizar el PCA para evaluar si el proceso es capaz de producir productos de alta calidad.

Según Montgomery (2009), el PCA incluye técnicas estadísticas útiles a lo largo de todo el ciclo de vida del producto. Se aplica en etapas de desarrollo antes de la fabricación, para cuantificar la variabilidad del proceso, compararla con las especificaciones y eliminar o reducir dicha variabilidad.

Como técnica fundamental en cualquier esfuerzo de mejora de calidad y procesos, se sostiene que el PCA permite mejorar procesos, productos o servicios para alcanzar mayores niveles de satisfacción del cliente. La capacidad del proceso puede estimarse frecuentemente a través del PCA, utilizando una distribución con parámetros de forma, centro (media) y dispersión (desviación estándar).(Fuente: Senvar y Tozan, 2010)

Para el PCA, pueden utilizarse las siguientes técnicas:

- **Histogramas:**

Gráficos estadísticos que muestran frecuencias. En aplicaciones de calidad, se reconocen como una de las siete herramientas básicas del control de calidad.

- **Gráficos de probabilidad:**

Útiles para estimar la capacidad del proceso y determinar los parámetros de una distribución (forma, centro y dispersión).

- **Gráficos de control:**

Sirven para establecer una línea base del desempeño del proceso y monitorear el efecto de cambios sobre este.

**2.1.2.3.2 Índices de capacidad del proceso.** Existen varios métodos estadísticos para medir la capacidad de un proceso. Las medidas de desempeño más utilizadas son los índices de capacidad del proceso (PCI), que relacionan los límites de tolerancia natural del proceso con los límites de especificación (English y Taylor, 1993). En la práctica, los más comunes son  $C_p$  y  $C_{pk}$ .

El índice  $C_p$  se usa frecuentemente para expresar la capacidad del proceso de forma simple y cuantitativa en ambientes industriales. Cuando los parámetros son conocidos, es decir, cuando la desviación estándar del proceso  $\sigma$  es conocida, se calcula como:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (4)$$

Donde:  $LSL$  y  $USL$  son los límites inferior y superior de especificación, respectivamente.

Para especificaciones unilaterales, el índice  $C_{pk}$  se define respecto al límite de especificación más cercano a la media del proceso. Cuando se conoce la media  $\mu$  y la desviación estándar  $\sigma$ , se calcula como:

$$C_{pk} = \frac{\min(USL - \mu, \mu - LSL)}{3\sigma} \quad (5)$$

En la práctica, muchas veces no se conocen los parámetros reales del proceso, por lo que es apropiado utilizar la media muestral  $\bar{x}$  y la desviación estándar muestral  $\delta$  para estimarlos. La fórmula para estimar  $C_{pk}$  es:

$$C_{pk} = \frac{\min(USL - \bar{x}, \bar{x} - LSL)}{3\delta} \quad (6)$$

La Tabla 2 presenta las diferencias entre  $C_p$  y  $C_{pk}$  según lo definido por Montgomery (2009).

**Tabla 2**

*Diferencias entre  $C_p$  y  $C_{pk}$*

<b><math>C_p</math></b>	<b><math>C_{pk}</math></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medida de la capacidad potencial del proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medida de la capacidad real del proceso</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No considera la ubicación de la media del proceso respecto a los límites de especificación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Toma en cuenta el centrado del proceso</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No contempla el caso en que la media del proceso no esté centrada entre los límites de especificación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Considera explícitamente el caso de un proceso cuya media <math>\mu</math> no está centrada entre los límites de especificación</li> </ul>

Fuente: Alsubaie (2016)

**2.1.2.3.3 Función de pérdida de Taguchi.** La capacidad de un proceso para satisfacer a los clientes en función de los límites de especificación puede analizarse mediante el análisis de capacidad del proceso (PCA). Sin embargo, también puede ser más apropiado examinar los costos asociados a la variación del proceso. Para ello, se puede utilizar la función de pérdida cuadrática de Taguchi, ideal para modelar los costos esperados. Esta función se basa en la desviación de las características de calidad de un producto respecto al valor objetivo. La función de pérdida de Taguchi se expresa de la siguiente manera:

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (7)$$

Donde:

$L$  = Representa la pérdida,

$k$  = Es una constante,

$y$  = Es el valor observado de la característica de calidad,

$m$  = Es el valor objetivo de dicha característica.

La filosofía de Taguchi enfatiza la necesidad de mantener una baja variabilidad en torno al objetivo, ya que incluso pequeñas desviaciones del valor meta resultan en una pérdida de calidad. En consecuencia, el proceso más capaz es aquel que produce el producto exactamente en el valor objetivo.

En realidad, los índices de capacidad del proceso (PCI) se basan también en una estimación de la pérdida esperada. Los esfuerzos de mejora de la calidad buscan reducir la varianza y minimizar sus efectos tanto como sea posible. Desde esta perspectiva, el enfoque pasa de simplemente cumplir con los límites de especificación a agruparse alrededor del valor objetivo, lo que convierte a la función de pérdida de Taguchi en una alternativa válida a los PCI tradicionales. (Fuente: Senvar y Tozan, 2010).

Taguchi y Wu (1979) argumentan que toda desviación respecto al valor objetivo representa una pérdida para la sociedad. En consonancia con esta visión, Kackar (1985) sostiene que “cuanto menor sea la variación del desempeño respecto al valor objetivo,

mejor será la calidad". Esto contrasta con la visión tradicional, que supone que los clientes están igualmente satisfechos mientras los productos se mantengan dentro de los límites de tolerancia. Taguchi propuso su función de pérdida cuadrática como una forma general de representar la variación del desempeño y como una técnica para definir tolerancias adecuadas. El fundamento de esta función está en cuantificar las pérdidas generadas cuando una característica de calidad se aleja de su objetivo previamente establecido.

Box, Bisgaard y Fung (1988) advierten que "en ejemplos más complejos, la función de pérdida puede resultar menos útil debido a la dificultad de caracterizar y equilibrar las pérdidas económicas reales". Aunque en muchos casos estimar con precisión la función de pérdida puede ser complejo y costoso, sigue siendo una herramienta mental útil para sensibilizar a los diseñadores sobre las consecuencias de la variación. Esta postura es respaldada por Deming (2000), quien afirma que "el uso más importante de la función de pérdida es ayudarnos a pasar de un mundo centrado en especificaciones a uno centrado en la reducción continua de la variación mediante la mejora de los procesos".

### ***2.1.3 Mejora de procesos***

La mejora de procesos, también conocida como mejora continua (CI, por sus siglas en inglés), se describe como una filosofía que, en términos simples, implica "iniciativas de mejora que aumentan los éxitos y reducen los fracasos". (Fuente: Deming, 1982).

También se define como "el acto de mejorar constantemente la eficiencia de los procesos al atacar el desperdicio, la variación y la baja calidad para mejorar los resultados y aprovechar al máximo los recursos disponibles". (Fuente: Shamou y Arunachalam, 2008).

**2.1.3.1 Implementación exitosa de la mejora de procesos.** Para formular los requisitos que deben cumplir los procesos, el desarrollo de un sistema de gestión de calidad (SGC) debe estar respaldado por el uso de normas (Pfeifer, Reissiger y Canales, 2004). Las normas de SGC más populares y reconocidas a nivel mundial son las de la familia ISO 9000. Publicada originalmente en 1987, esta familia fue revisada en 1994 y nuevamente en diciembre de 2000. La versión revisada, ISO 9000:2000, se basa en ocho principios de gestión de calidad:

- Enfoque al cliente
- Liderazgo
- Participación del personal
- Enfoque basado en procesos
- Enfoque de sistema para la gestión
- Mejora continua
- Enfoque basado en hechos para la toma de decisiones
- Relaciones mutuamente beneficiosas con los proveedores (ISO, 2008)

**2.1.3.2 Necesidad de la mejora de procesos.** Según Deming (1982), la mejora de procesos es esencial para satisfacer las necesidades cambiantes de los clientes. Debido a la intensa competencia global, las empresas han incrementado su interés en mejorar sus procesos. Esta necesidad responde a cuatro razones principales:

- **Enfrentar el mercado competitivo:**

Con mayor calidad y menores tiempos de entrega, los fabricantes deben ser conscientes de que sus competidores intentan ofrecer los mismos productos a menor costo.

- **Mejorar la calidad:**

Es clave abarcar todas las actividades realizadas durante la vida del producto, desde su creación hasta después de que llega al cliente (como desarrollo, cadena de suministro, manufactura, entrega, servicio y soporte).

- **Satisfacer a los clientes:**

Gracias a mejores niveles educativos, acceso a Internet y estándares de vida más altos, los consumidores demandan productos de mayor calidad, personalizados, con valor agregado e innovadores.

- **Asegurar la flexibilidad ante cambios del mercado y la incertidumbre:**

Las empresas deben adaptarse rápidamente a entornos cambiantes para mantenerse competitivas.

**2.1.3.3 Necesidad de la mejora de procesos en el contexto de servicios.** El sector de servicios presenta desventajas notables en el proceso de mantenimiento de equipos, entre las que destacan:

- Durante el proceso de mantenimiento, falta monitoreo, análisis y medidas de mejora.
- En la gestión de calidad del mantenimiento, los métodos son simples y desactualizados, y el personal de inspección toma decisiones basadas en la intuición o conjeturas en lugar de en datos.
- La teoría moderna de gestión de calidad no se aplica generalmente en los sistemas de calidad del servicio. Como resultado, la gestión es débil, no estandarizada, con responsabilidades poco claras, y existe dificultad para investigar y corregir problemas.

**2.1.3.4 Tipos de herramientas para la mejora de procesos.** La segunda ola de herramientas de mejora, que comenzó a finales de los años 70 y principios de los 80, tuvo un alcance más amplio (Nicholas, 1998). En lugar de enfocarse en procesos individuales de planta, estas herramientas buscaron mejorar toda la operación de manufactura, desde la recepción de pedidos hasta la entrega final del producto. Algunas de las herramientas representativas son:

- Gestión de la calidad total (TQM)
- Manufactura Lean o justo a tiempo (JIT)
- Six Sigma
- Reingeniería de procesos

#### **2.1.4 Six Sigma**

Six Sigma es una metodología sistemática orientada a la excelencia operativa mediante la mejora continua de los procesos. Se define como “un enfoque consolidado que busca identificar y eliminar defectos, errores o fallos en los procesos o sistemas empresariales, enfocándose en aquellas características del desempeño del proceso que son de importancia crítica para los clientes” (Antony, 2008). En este proceso, Six Sigma

tiene la capacidad de reducir defectos y variaciones, así como de incrementar los beneficios económicos y otros indicadores clave del negocio.

Según Jiju Antony et al. (2015), mediante la aplicación de las etapas Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC) — que constituyen el método más común en Six Sigma — y el uso de herramientas asociadas como el análisis de Pareto, diagramas causa-efecto y análisis de causa raíz, Six Sigma se posiciona como la mejor solución para problemas empresariales con causa raíz desconocida.

De acuerdo con Pophaley y Vyas (2015), la literatura describe tres generaciones de Six Sigma:

- **Primera generación (1986–1990):**

Enfocada en la eliminación de defectos, mejora de la calidad de productos y servicios, reducción de costos y mejora continua.

- **Segunda generación (década de 1990):**

Evoluciona hacia un sistema de gestión centrado en el negocio, desplazando el foco de la calidad del producto hacia la calidad de la gestión empresarial.

- **Tercera generación (a partir del año 2000):**

Surgen desarrollos como la integración de técnicas de manufactura esbelta con Six Sigma, dando origen a Lean Six Sigma (LSS), así como su incorporación al mantenimiento industrial.

Artiba et al. (2008) informan que la implementación del concepto de Six Sigma en aplicaciones de confiabilidad y mantenimiento de equipos ha cobrado relevancia recientemente, ya que históricamente esta metodología se había limitado a procesos administrativos y de manufactura. Arifin y Nehzati (2012) sostienen que diversos estudios actuales demuestran que Six Sigma es adecuado para la gestión del mantenimiento, especialmente al integrar evaluaciones estadísticas.

El modelo de mantenimiento Six Sigma de Thomas, Barton y Byard (2008) combina técnicas de gestión empresarial con estrategias de mantenimiento productivo total (TPM), ofreciendo a los gerentes e ingenieros de mantenimiento un marco estratégico para

aumentar la eficiencia productiva. La implementación de un marco operativo estandarizado para aplicar ambas metodologías se considera un paso necesario para que las empresas logren beneficios simultáneos de TPM y Six Sigma.

Más recientemente, Pophaley y Vyas (2015), al analizar la brecha entre las prácticas tradicionales de mantenimiento y el enfoque Six Sigma, concluyen que existe un amplio margen para recomendar Six Sigma en el desarrollo teórico del mantenimiento. Para alcanzar sus objetivos, la industria automotriz debe adoptar esta metodología, transformando así las prácticas tradicionales hacia una mejora continua en la función de mantenimiento.

**2.1.4.1 Relación entre Six Sigma y la capacidad del proceso.** Según Montgomery (2009), para obtener una estimación confiable de la capacidad del proceso, este debe estar estable o bajo control estadístico. Senvar y Tozan (2010) afirman que la explicación técnica de Six Sigma puede lograrse mediante el uso de la distribución normal y los índices de capacidad del proceso (PCI). Generalmente, Six Sigma utiliza el índice  $C_p$ , considerado como una medida estándar de calidad.

Six Sigma fue desarrollado para enfrentar la complejidad de los productos y analizar sus fallos, ofreciendo herramientas para obtener un rendimiento predictivo. En un estudio de capacidad del proceso dentro de Six Sigma, el número de desviaciones estándar entre la media del proceso y el límite de especificación más cercano se expresa en unidades sigma. El nivel sigma de un proceso indica su capacidad, es decir, qué tan bien se desempeña respecto a los límites de especificación. En términos estadísticos, sigma representa la variación en la media del proceso.

La aplicación de la metodología Six Sigma permite reducir la variación y aumentar simultáneamente la capacidad y el desempeño del proceso. Estas mejoras se logran tras una implementación exitosa de Six Sigma, la cual se reconoce como un enfoque riguroso de control de calidad.

El enfoque de Six Sigma puede interpretarse directamente en términos de capacidad del proceso, vinculándose a la variación mediante el uso de índices como  $C_{pk}$ .

Actualmente, muchos fabricantes están obligados a producir con un valor de  $Cpk$  específico, lo que refleja la presión por mantenerse competitivos a nivel mundial. Las organizaciones deben cumplir o superar estos niveles de calidad establecidos. Cabe destacar que los valores de  $Cpk$  están directamente relacionados con la magnitud de la variación de un producto o proceso en relación con sus requerimientos o especificaciones.

Un valor alto de  $Cpk$  indica un proceso más capaz y de mejor calidad, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Implicancias del Índice de capacidad del proceso ( $Cpk$ )*

Capacidad del proceso	$Cpk$	Rango de Especificación		Partes por Millón (PPM) defectuosas
		Nivel Sigma a Largo Plazo	Nivel Sigma a Corto Plazo	
Menos capaz	1	1.5	3	66,807
Capaz	1.33	2.5	4	6,210
Muy capaz	1.67	3.5	5	233
Six Sigma	2	4.5	6	3.4

Fuente: Alsubaie (2016)

**2.1.4.2 Interpretación estadística de Six Sigma.** En un proceso Six Sigma, como su nombre lo indica, existen seis desviaciones estándar entre la media del proceso y los límites de especificación, cuando el proceso está centrado. El objetivo del enfoque Six Sigma es reducir la variación del proceso y, con ello, los defectos. La métrica utilizada en Six Sigma es el DPMO, que significa defectos por millón de oportunidades. En este contexto, las “oportunidades” representan el número de posibles ocasiones dentro de una unidad en las que puede ocurrir un defecto.

$$DPMO = \frac{N^{\circ} \text{ total de defectos}}{N^{\circ} \text{ unidades} * N^{\circ} \text{ oportunidades por unidad}} \quad (8)$$

Six Sigma representa un nivel de calidad que no supera los 3.4 defectos por millón de oportunidades (DPMO) a largo plazo. Debido a causas asignables inevitables, los procesos pueden desplazarse hasta 1.5 desviaciones estándar desde la media del proceso hacia cualquiera de los límites de especificación, manteniéndose aún dentro del umbral de

3.4 defectos por millón. Esto significa que la medición de capacidad del proceso en Six Sigma permite un desplazamiento de hasta 1.5 sigma a largo plazo.

En términos estadísticos, el valor de 3.4 DPMO corresponde al área bajo la curva normal más allá de  $6 - 1.5 = 4.5$  sigma. De manera similar, para un proceso de tres sigma, el valor de 66,807 DPMO representa el área bajo la curva normal más allá de  $3 - 1.5 = 1.5$  sigma. (Fuente: Antony et al., 2005).

Para un proceso con un nivel de calidad inferior al de Six Sigma, la tasa de éxito disminuye significativamente cuando el proceso se desplaza. Desde esta perspectiva, si una organización opera a nivel Six Sigma, se dice que tiene menos de 3.4 defectos por millón de oportunidades, lo que equivale a una tasa de éxito del 99.9997 %. En cambio, si una organización opera a nivel de tres sigma, presenta 66,807 DPMO, equivalente a una tasa de éxito del 93 %. (Fuente: McClusky, 2000).

Por lo tanto, el nivel de tres sigma no puede considerarse un desempeño de calidad alto, ya que no es suficiente para muchos productos o procesos que buscan evitar problemas de calidad en el largo plazo. En conclusión, Six Sigma se representa por 3.4 partes defectuosas por millón (ppm) (Harry, 1998), y esto implica mejorar la capacidad del proceso en todas las CTQ (características críticas para la calidad) de todos los procesos dentro de la organización.

El objetivo en una organización Six Sigma es alcanzar niveles de defectos inferiores a 3.4 ppm en cada proceso y para cada característica crítica de calidad producida por dichos procesos.

**2.1.4.3 Lean Six Sigma.** Lean Six Sigma (LSS) se ha convertido en la estrategia empresarial más popular para la mejora continua (CI) en los sectores manufacturero, de servicios y también en el sector público. Esta poderosa metodología de mejora continua es una combinación sinérgica entre el pensamiento Lean y Six Sigma. Snee (2010) define LSS como “una estrategia empresarial y metodología que incrementa el rendimiento del proceso, lo que resulta en una mayor satisfacción del cliente y mejores resultados

económicos”. LSS aplica herramientas y procedimientos tanto de la manufactura esbelta como de Six Sigma. (Fuente: Albliwi et al., 2014).

Como se indicó anteriormente, LSS combina los métodos Lean con Six Sigma, utilizando procesos específicos del enfoque DMAIC para proporcionar a las empresas mayor velocidad y menor variación, con el objetivo de aumentar la satisfacción del cliente. (Fuente: George, 2002).

- **La primera fase:**

Definir, consiste en establecer los objetivos del proyecto y las necesidades del cliente.

- **La segunda fase:**

Medir, implica registrar errores, evaluar el desempeño del proceso y cuantificar los problemas.

- **La tercera fase:**

Analizar, se enfoca en interpretar los datos y encontrar las causas de los defectos.

- **La cuarta fase:**

Mejorar, busca eliminar las causas de los errores y reducir su frecuencia.

- **La fase final:**

Controlar, incluye mantener la estabilidad del proceso y asegurar la mejora continua del rendimiento.

Según Antony (2015), LSS como metodología no es un procedimiento estandarizado, por lo que puede adaptarse a diferentes sectores. En la literatura se describen diversas formas de aplicar LSS. Además, ha sido implementado con éxito en múltiples industrias y sectores (Antony, 2015). Aunque la mayoría de los casos documentados provienen del sector manufacturero, Psychogios y Tsironis (2012) destacan ejemplos de aplicación en el sector de servicios, tanto público como privado. Existen pruebas de implementaciones exitosas en organizaciones militares, como el Ejército de los Estados Unidos. También se han reportado casos en servicios de salud y gobiernos locales que han aplicado LSS con buenos resultados.

Apte y Kang (2006) informan que la metodología LSS se desarrolló inicialmente en el sector privado. Sin embargo, dadas las exigencias del entorno competitivo, es necesario modificar adecuadamente su implementación en el ámbito militar, ya que la cultura organizacional y la naturaleza de los desafíos operativos son considerablemente distintos a los de las empresas privadas. Los autores afirman que, aunque estas diferencias deben ser analizadas cuidadosamente por los planificadores militares, los beneficios de reducir los costos del ciclo de vida y mejorar la preparación operativa mediante LSS son demasiado importantes como para ignorarlos. Concluyen que implementar Lean Six Sigma en el ámbito militar es una iniciativa logística de importancia estratégica, y recomiendan que se lleve a cabo con total determinación y compromiso.

**2.1.4.4 Importancia de Lean Six Sigma (LSS) en el proceso de mantenimiento de equipos.** La implementación de los sistemas actuales de gestión del mantenimiento no ha alcanzado el nivel de éxito esperado (por ejemplo, los cronogramas de mantenimiento no se ejecutan a tiempo y es difícil establecer prioridades). La causa subyacente radica en la falta de competencias en gestión del mantenimiento y de experiencia en ejecución, lo que genera impactos negativos en el desempeño general. Además, las inspecciones o reparaciones innecesarias incrementan los compromisos presupuestarios en mantenimiento y reducen el rendimiento de calidad, en relación con el desperdicio en el área de mantenimiento. Estos problemas evidencian que los procesos de mantenimiento contienen etapas que no agregan valor, y por tanto, requieren de iniciativas de mejora continua (CI). (Fuente: Aldairi, Khan y Munive-Hernández, 2015).

Wang, Wang y Xu (2012) han reportado que LSS puede aplicarse a la gestión de la calidad en el mantenimiento de equipos, con el objetivo de corregir deficiencias e ineficiencias dentro del proceso. Concluyen que la implementación de LSS en el mantenimiento de equipos debe sostener la filosofía de mejora continua y renovar constantemente el enfoque de gestión, con el fin de fortalecer la capacidad de mantenimiento.

Sin embargo, la adopción de LSS en el mantenimiento dentro del sector servicios aún se encuentra considerablemente rezagada. Desde el punto de vista de los profesionales del área, este retraso puede deberse a diversos factores, como:

- La estructura organizacional compleja,
- Los objetivos múltiples y diversos de las organizaciones,
- Y el hecho práctico de que los desperdicios y retrabajos no son tan visibles como en el sector manufacturero, donde los materiales desechados y las colas de producción tienen una manifestación física clara.

**2.1.4.5 Necesidad de un modelo integrado de LSS y optimización del proceso de mantenimiento.** Según Dhillon (2006), el mantenimiento representa entre el 60 % y el 75 % de los costos del ciclo de vida de un sistema grande o de un producto. Esto plantea automáticamente un desafío para la gestión del mantenimiento, ya que debe validar el desempeño de los activos y asignar los fondos necesarios. Una de las principales debilidades de los sistemas de gestión del mantenimiento es la falta de experiencia, lo cual conlleva a la obtención de información imprecisa para la toma de decisiones, perdiéndose así el control sobre la priorización de tareas (Aldairi, Khan y Munive-Hernández, 2015). El desempeño de la gestión de operaciones de mantenimiento debe ser analizado y revisado constantemente para lograr altos niveles de calidad del servicio (Aldairi, Khan y Munive-Hernández, 2015). No obstante, al intentar mantener un rendimiento consistentemente alto, el enfoque tradicional puede conducir al agotamiento excesivo de los recursos, por lo que se requiere una estrategia más actualizada que aborde estos problemas.

Adicionalmente, el mantenimiento de equipos presenta altas exigencias en velocidad, calidad y reducción de costos. Sin embargo, algunas deficiencias en el sistema de gestión de calidad afectan y limitan tanto la calidad como la eficiencia del mantenimiento de equipos, generando así costos elevados. En consecuencia, la gestión del mantenimiento ha cobrado mayor relevancia, y es necesario el apoyo de la ciencia para optimizarla. En ese sentido, la gestión del mantenimiento podría beneficiarse del desarrollo

de un amplio campo de la investigación operativa denominado optimización del mantenimiento.

Hammer (2002) argumenta que las distintas iniciativas de mejora deben posicionarse dentro de un marco más amplio de gestión de procesos, en concordancia con lo planteado por Zhao, Ye y Gao (2012), quienes proponen que Lean Six Sigma (LSS) sea incorporado al sistema de optimización de procesos para cumplir con el objetivo de mejora continua en el mantenimiento de equipos. Esta necesidad justifica el desarrollo de un sistema de gestión que integre LSS como una filosofía avanzada de calidad junto con técnicas de optimización de procesos, especialmente orientado al mantenimiento de flotas vehiculares, con el fin de respaldar la toma de decisiones.

## **2.2 Marco conceptual**

### **2.2.1 Capacidad**

Se refiere a la habilidad de un proceso para producir resultados que se mantengan dentro de los límites de especificación establecidos. Se expresa cuantitativamente mediante índices como  $C_p$  y  $C_{pk}$ , y está estrechamente relacionada con la variabilidad y el centrado del proceso.

### **2.2.2 Confiabilidad**

Es la probabilidad de que un componente, sistema o equipo cumpla su función durante un periodo de tiempo determinado sin fallas, bajo condiciones específicas de operación. En el caso de llantas de camiones mineros, la confiabilidad es clave para minimizar tiempos improductivos por mantenimiento.

### **2.2.3 Desperdicio**

Cualquier actividad que consume recursos pero no agrega valor al producto o servicio final. En el mantenimiento de llantas, se considera desperdicio al tiempo o recursos utilizados en inspecciones innecesarias, esperas, movimientos excesivos o retrabajos.

### **2.2.4 DMAIC**

Metodología estructurada de mejora continua utilizada en Six Sigma: Definir: los objetivos del proyecto y necesidades del cliente, Medir: el desempeño actual del proceso,

Analizar: las causas raíz del problema, Mejorar: mediante soluciones efectivas, Controlar: para asegurar la sostenibilidad de los resultados

### **2.2.5 Lean**

Enfoque de gestión que busca eliminar el desperdicio y aumentar la velocidad de los procesos. Su aplicación en el cambio de llantas busca reducir tiempos muertos, pasos innecesarios y optimizar recursos humanos y técnicos.

### **2.2.6 Llantas**

Neumáticos de gran tamaño diseñados para camiones mineros de acarreo. Son componentes críticos cuya manipulación, inspección y cambio demandan procedimientos específicos de seguridad, coordinación logística y personal capacitado.

### **2.2.7 Mantenimiento**

Conjunto de actividades técnicas y administrativas que permiten conservar o restaurar un activo a un estado en el que pueda cumplir su función. En el contexto de esta investigación, se analiza el mantenimiento preventivo y correctivo asociado al cambio de llantas.

### **2.2.8 Optimización**

Acción de mejorar la eficiencia, efectividad y desempeño de un proceso mediante el uso de herramientas analíticas y metodológicas. Se busca reducir el tiempo total de cambio de llantas sin comprometer la seguridad ni la calidad del servicio.

### **2.2.9 Six-Sigma**

Metodología de mejora de procesos que busca reducir la variación y los defectos, incrementando la capacidad del proceso. Su enfoque se basa en el análisis estadístico y la toma de decisiones basada en datos, con el objetivo de alcanzar niveles de calidad equivalentes a 3.4 defectos por millón de oportunidades.

### **2.2.10 Variación**

Desviación de un proceso respecto al valor objetivo o especificado. Su reducción es fundamental para lograr mejoras sostenibles en tiempo de respuesta, confiabilidad y eficiencia de los procesos de mantenimiento.

## Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

### 3.1 Recolección de datos

#### 3.1.1 Unidad de estudio

**3.1.1.1 Ubicación y accesibilidad.** La operación minera objeto de estudio se encuentra en el distrito de San Marcos, en la provincia de Huarney, región Áncash, al norte del Perú, a una altitud aproximada de 4,300 metros sobre el nivel del mar. Esta mina es considerada una de las más relevantes del país debido a su destacada producción de cobre, zinc, plata y molibdeno. El acceso principal se realiza por vía terrestre a través de la Carretera Panamericana Norte, partiendo desde la ciudad de Chimbote en dirección a Huarney, y posteriormente recorriendo un trayecto adicional hacia el yacimiento, el cual está situado aproximadamente a 80 km al este de Chimbote y a unos 20 km de Huarney.

**Figura 8**

*Mapa de ubicación del proyecto minero*



Fuente: Proyecto minero

### **3.1.1.2 Geología del proyecto minero.**

**3.1.1.2.1 Geología regional.** El yacimiento se encuentra en la cordillera occidental de los Andes del Perú, en un entorno geológico que abarca desde el Jurásico Medio hasta el Cretácico Superior, siendo parte del reconocido cinturón metalogenético polimetálico del norte peruano.

Entre la mina y el océano Pacífico se ubican la Zona Costera y la Cordillera Negra, regiones asociadas a un arco magmático activo que se desarrolló entre el Jurásico Tardío y el Terciario. Este arco está conformado por formaciones volcánicas del grupo Casma (105–95 Ma), el Batolito Costero (100–50 Ma), y los volcanes del grupo Calipuy (95–39 Ma). Dicho arco fue deformado por eventos tectónicos durante el Cretácico, conocidos como la Fase Mochica y la Fase Peruana.

Al este del arco magmático se encuentra la Depresión Occidental o Geosinclinal Peruano Occidental, una cuenca alargada donde se depositaron sedimentos gruesos desde el Jurásico Tardío hasta el Cretácico Tardío. Estos sedimentos incluyen pizarras y cuarcitas de la Formación Chicama (152–144 Ma), y capas de origen marino del Grupo Goyllarisquizga (144–114 Ma). Más adelante, ocurrió una transgresión marina con la acumulación de carbonatos (Formaciones Pariahuanca, Chulec, Pariatambo y Jumasha), seguidos por pizarras de la Formación Celendín (88–84 Ma). Con el levantamiento de los estratos y la regresión marina, se depositaron capas rojas continentales en el Cretácico Tardío y Paleoceno (Formación Casapalca).

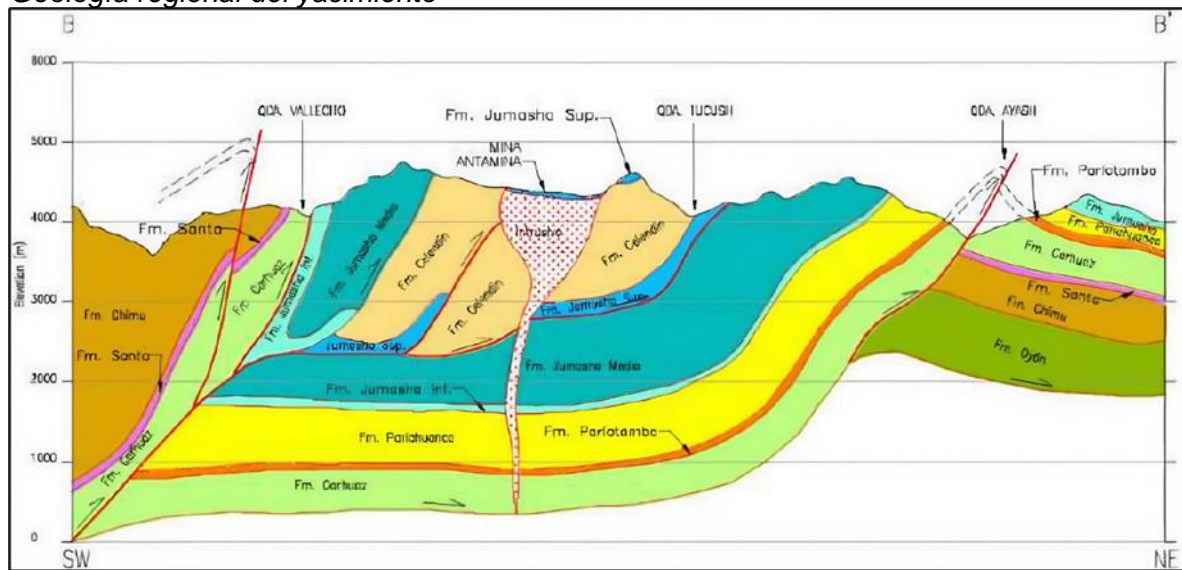
El depósito está alojado principalmente sobre calizas y margas de la Formación Celendín, en el sector oriental de la Depresión Occidental. Esta depresión fue interrumpida por el Geoanticlinal Marañón, una estructura de origen precámbrico conformada por rocas metamórficas como esquistos y filitas, que actualmente forman la Cordillera Oriental.

Más al este, sobre la base frontal de la Cuenca Oriental o Geosinclinal Peruano Oriental, se acumularon secuencias mesozoicas de areniscas y carbonatos que hoy conforman el cinturón subandino y la zona de empuje andina, en contacto con el Escudo Brasileño.

Finalmente, en el área se ha identificado una estructura sinclinal regional, consistente con los cambios en la orientación de los estratos de la Formación Celendín, particularmente en el valle Tucush (flanco suroeste). También se han observado fallas inversas y de rumbo, con direcciones opuestas de buzamiento, lo cual explica la aparición de formaciones más antiguas en superficie.

**Figura 9**

*Geología regional del yacimiento*



Fuente: Proyecto minero

**3.1.1.2.2 Geología local.** A nivel local, el depósito mineral se desarrolla sobre rocas carbonatadas pertenecientes a las formaciones Jumasha y Celendín, las cuales han sido intruidas por un pórfido cuarzomonzonítico, lo que dio lugar a la formación de un sistema de skarn bien definido. La estructura geológica del área está influenciada por fallas normales con orientación noreste, perpendiculares al eje de los Andes, así como por fallas de sobreescurreamiento subparalelas al sistema andino, asociadas a pliegues con rumbo noroeste, los cuales han determinado en gran medida la geometría del depósito.

El flanco oriental de la Cordillera Blanca está conformado por una densa secuencia de rocas sedimentarias, entre ellas calizas, mudstones, margas y areniscas. Esta zona se encuentra en una región de transición entre la cuenca de Chavín y la cuenca del Marañón. Desde las unidades más jóvenes hasta las más antiguas, las formaciones sedimentarias

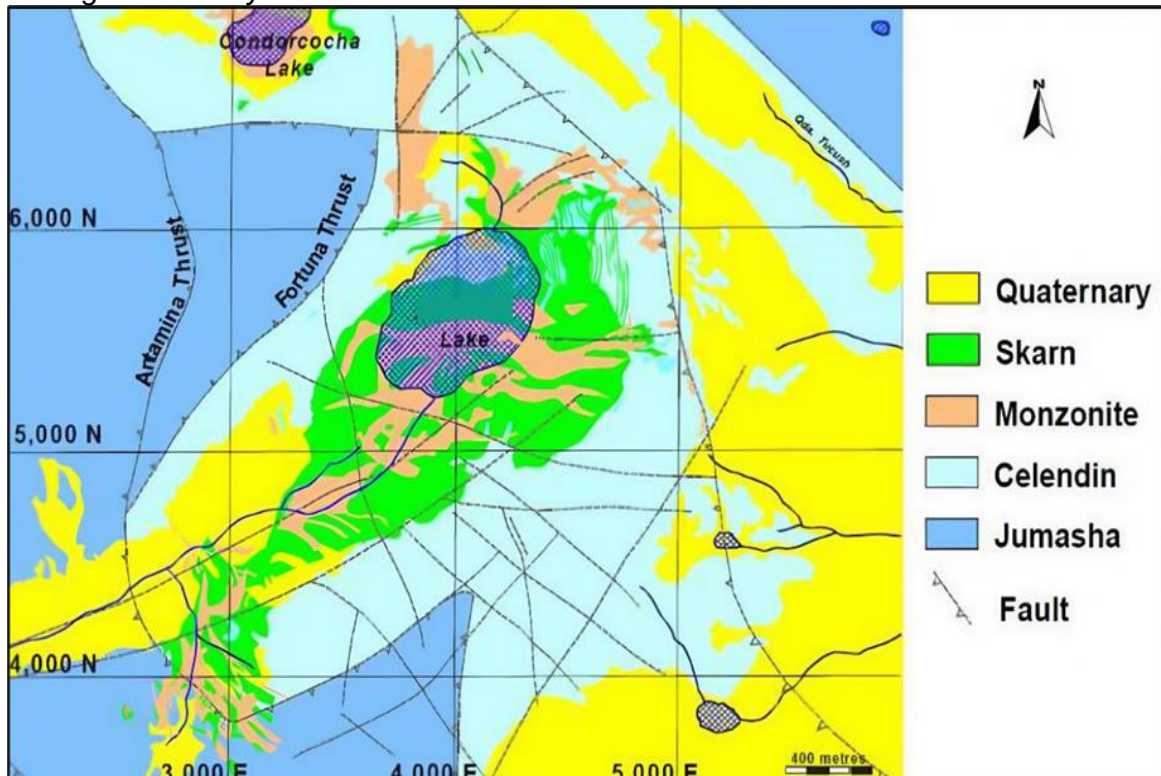
que afloran incluyen: Celendín, Jumasha, Pariatambo, Pariahuanca, Carhuaz, Santa, Chimú y Chicama.

El depósito se encuentra alojado en una secuencia interestratificada de rocas sedimentarias plegadas del Cretácico Superior, cuya mineralización ha sido favorecida por la presencia de intrusiones terciarias. La erosión posterior ha modelado el paisaje, generando valles en los sedimentos más blandos y acantilados escarpados en zonas de caliza más competente.

En cuanto a la cobertura superficial, el espesor del suelo orgánico en los valles varía generalmente entre 20 y 40 cm, aunque puede alcanzar hasta 1.3 metros en zonas deprimidas. El suelo típico está compuesto por limos de color pardo a negro, ricos en materia orgánica, que reposan sobre una capa de arcilla limosa con grava. En los pisos de valle también se encuentran depósitos de morrenas glaciares y suelos coluviales, que pueden alcanzar espesores de hasta 30 metros.

**Figura 10**

*Geología local del yacimiento*



Fuente: Proyecto minero

**3.1.1.2.3 Zonación y alteración.** El depósito mineralizado se caracteriza por un skarn con zonación concéntrica, que se desarrolla desde el núcleo intrusivo hacia la roca encajonante. En el endoskarn, predominan granates marrones y rosados, mientras que el exoskarn presenta granates verdes a marrones, junto con diópsido, wollastonita, hornfels, mármol y calizas no alteradas. En la zona de contacto entre el intrusivo y el endoskarn son comunes las brechas heterolíticas, compuestas por fragmentos de distintas litologías skarn.

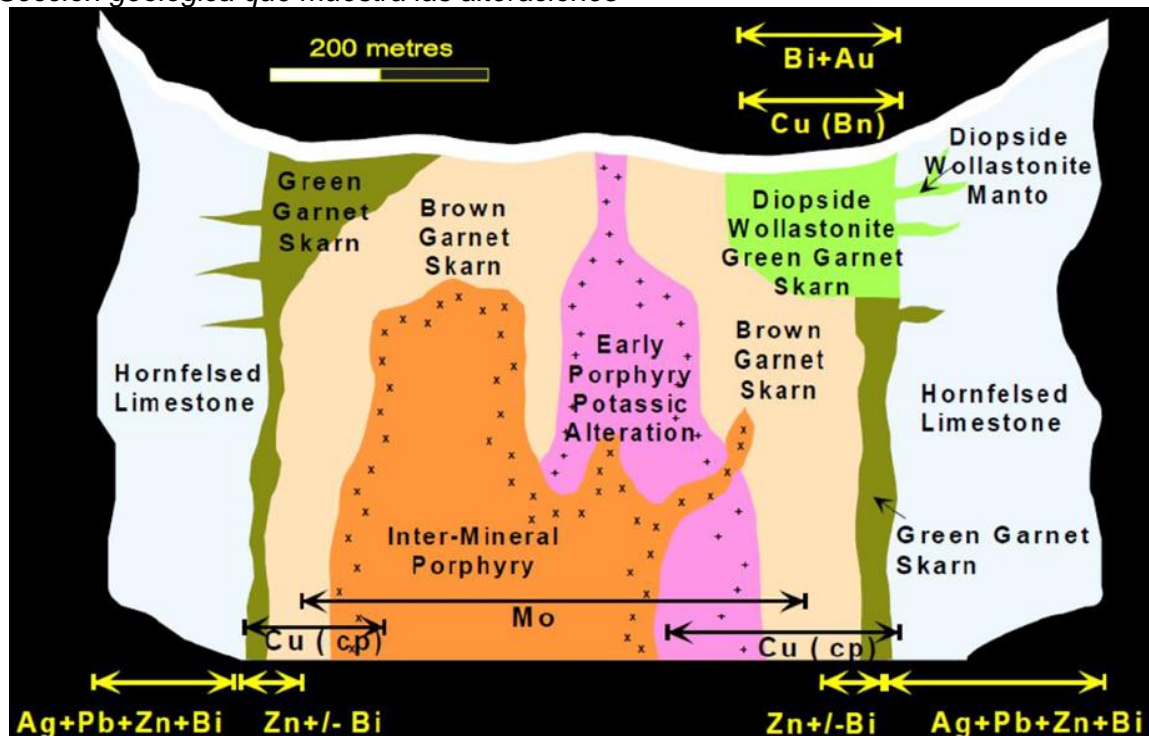
Este skarn exhibe una importante alteración retrógrada, especialmente en el endoskarn, donde se desarrollan minerales como clorita, epidota, actinolita, cuarzo, calcita, sericita y arcillas. Estos minerales contribuyen a enriquecer la mineralización y a consolidar el sistema económico del depósito.

El skarn se forma cuando fluidos hidrotermales ricos en metales, como cobre y zinc, interactúan con una roca caliza anfitriona. En este caso, un fluido mineralizante silíceo fluye hacia la caliza, generando una zonificación estructural clara: un núcleo intrusivo central rodeado por el endoskarn, luego el exoskarn y, finalmente, la caliza encajonante. La transición entre endoskarn y exoskarn no es abrupta, sino que muestra un gradiente mineralógico progresivo.

Desde el punto de vista geoquímico, el depósito muestra una zonificación metálica típica, controlada principalmente por la temperatura del sistema. En las zonas más cercanas al intrusivo, predomina el cobre; hacia los márgenes, el zinc se vuelve más común; y en las zonas más frías y externas aparece el plomo. El bismuto generalmente se asocia con el zinc, aunque también se encuentran vetas ricas en cobre con bismuto, así como cuerpos de cobre y zinc sin este elemento. El molibdeno se localiza cerca del intrusivo, concentrándose en aproximadamente el 25 % de la mena, que representa el 75 % de los valores de molibdeno, mayoritariamente en asociaciones de cobre puro.

Figura 11

Sección geológica que muestra las alteraciones



Fuente: Proyecto minero

### 3.1.2 Six Sigma – etapa Definir

Como parte fundamental de esta investigación, se aplicó la metodología Six Sigma con el propósito de optimizar el proceso de cambio de llantas en camiones mineros, cumpliendo así los objetivos definidos. Esta metodología, reconocida por su enfoque estructurado en la mejora continua de procesos, se desarrolla a través de cinco fases: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC). El presente capítulo inicia con la fase Definir, la cual constituye el punto de partida del proyecto y tiene como finalidad enmarcar claramente el problema y establecer las bases para su análisis.

Durante esta etapa se abordan los componentes clave que orientan la dirección del proyecto:

- **El planteamiento del problema:**

Que describe la situación actual y sus implicancias.

- **El alcance del proyecto:**

Que delimita qué procesos, áreas y recursos serán considerados.

- **La métrica primaria:**

Que representa el indicador principal a mejorar (en este caso, el tiempo de cambio de llantas).

- **La métrica secundaria:**

Que incluye variables relacionadas que podrían verse afectadas por la mejora (como tiempo parcial de cambio de llantas, número de incidentes en la bahía de llantas).

- **El diagrama SIPOC:**

Herramienta que permite visualizar de forma general el proceso, identificando los proveedores, entradas, proceso, salidas y clientes involucrados.

Esta fase proporciona una visión estructurada del problema y sienta las bases para el análisis profundo en las etapas siguientes.

**3.1.2.1 Planteamiento del problema.** Dentro de los objetivos estratégicos de Mantenimiento Mina está el de aumentar la disponibilidad de la flota de camiones de acarreo. A mediados del 2013 se identificó la oportunidad mejorar este indicador mediante la reducción del tiempo de cambio de llantas, siendo el tiempo de cambio de las posiciones 3-4 y 5-6 el que mayor brecha presentaba, comparado con otras operaciones, se decidió realizar un proyecto para mejorar este tiempo centrado en camiones Komatsu.

**3.1.2.2 Alcance del proyecto.** El presente proyecto se enfoca en el proceso operativo de cambio de llantas en camiones mineros, específicamente en las actividades realizadas dentro del área de mantenimiento conocida como Truck Shop. El alcance comprende desde el ingreso del camión al punto de recepción del taller, donde se inicia la evaluación técnica, hasta su salida con destino a la operación minera o su reubicación hacia una bahía de mantenimiento dentro del mismo taller, dependiendo del requerimiento posterior.

Este límite operacional incluye todas las etapas intermedias vinculadas al cambio de llantas, tales como: la recepción y registro del equipo, diagnóstico, asignación de recursos, desmontaje y montaje de neumáticos, inspecciones, pruebas funcionales y

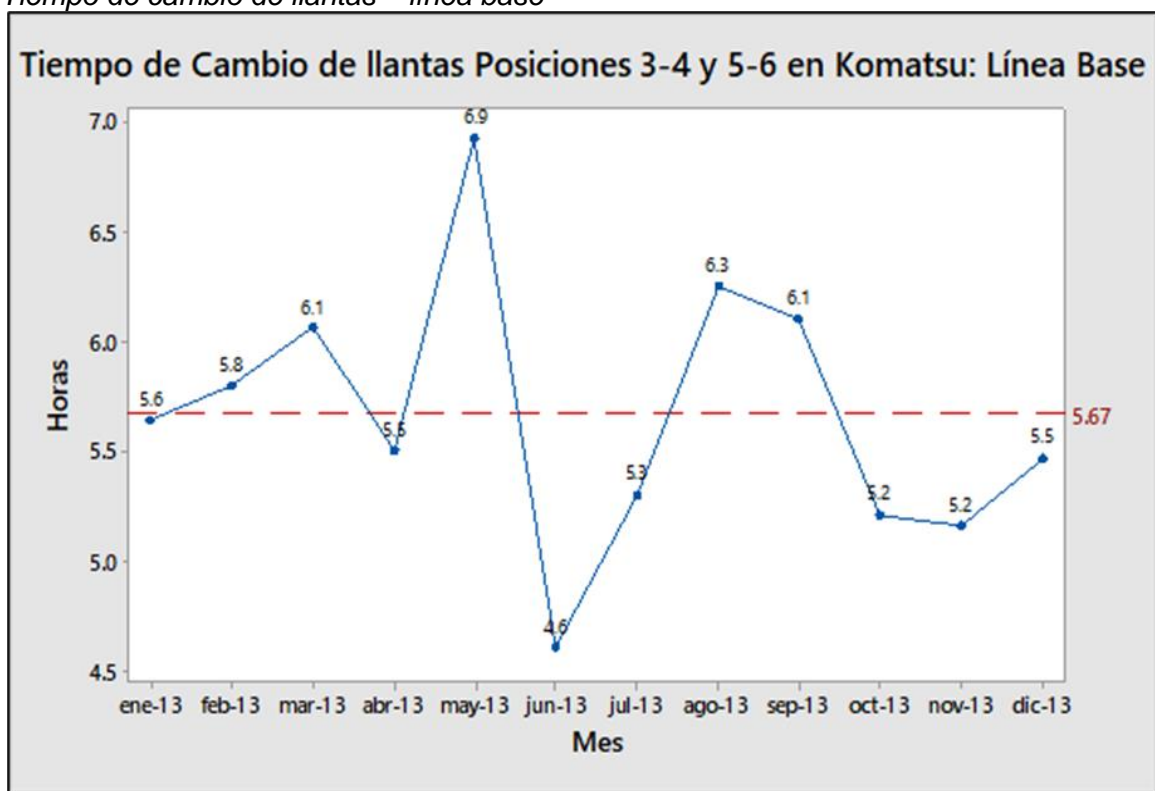
liberación del vehículo. No se consideran dentro del alcance los procesos logísticos previos (como el despacho de llantas desde almacén) ni las actividades posteriores a la entrega del camión para otros tipos de mantenimiento no relacionados.

El enfoque del análisis se centra en los tiempos y secuencias de ejecución del cambio de llantas, buscando identificar oportunidades de mejora sin interferir en procesos paralelos o externos al flujo principal definido.

**3.1.2.3 Métrica primaria.** La métrica primaria seleccionada para este proyecto corresponde al tiempo promedio mensual (en horas) que toma ejecutar el cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones pertenecientes a la flota Komatsu. Esta métrica representa el indicador clave de desempeño del proceso evaluado, ya que refleja de manera directa la eficiencia operativa en una de las tareas críticas del mantenimiento de neumáticos.

**Figura 12**

*Tiempo de cambio de llantas – línea base*



Fuente: Elaboración propia

El análisis se centrará en esta métrica porque constituye una variable cuantificable, comparable y sensible a las mejoras propuestas. Su monitoreo permitirá medir objetivamente el impacto de las acciones implementadas a lo largo del ciclo DMAIC.

Para el cálculo de este indicador se empleará la información consolidada de los tiempos de intervención, registrada y reportada mensualmente por el área de supervisión de llantas. Esta base de datos proporcionará los valores reales observados en campo, desglosados por tipo de cambio, posición y unidad intervenida, lo que permitirá establecer una línea base y evaluar la evolución del desempeño del proceso durante el proyecto.

**3.1.2.4 Métricas secundarias.** Si bien el objetivo principal del proyecto es reducir el tiempo promedio de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de la flota Komatsu, es fundamental asegurar que dicha mejora no genere impactos negativos en otras variables operativas críticas. En este sentido, se identifican dos métricas secundarias que deben mantenerse controladas a lo largo de la implementación:

- **Tiempo parcial de cambio de llantas:**

Hace referencia al tiempo dedicado a cada fase intermedia del proceso (desmontaje, montaje, inspección, etc.). Una reducción del tiempo total no debe implicar recortes arbitrarios que comprometan la calidad o integridad de estas etapas.

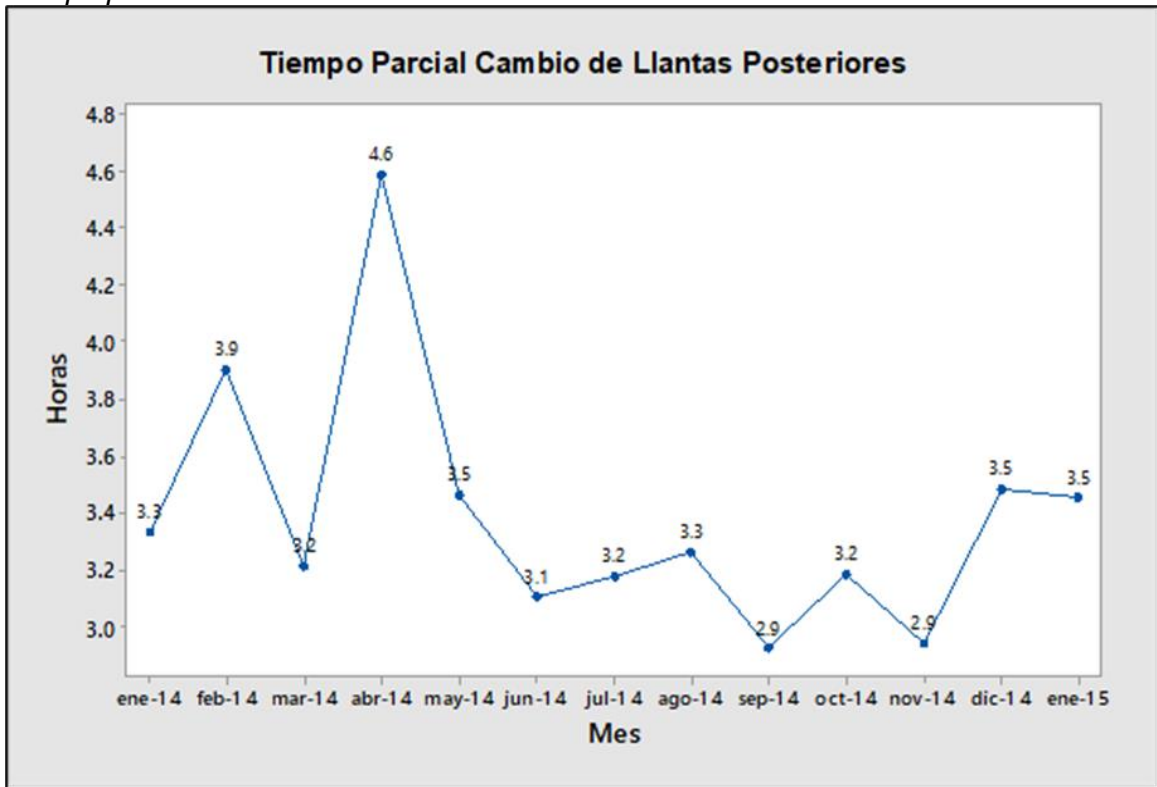
- **Número de incidentes en la bahía de llantas:**

Representa los eventos no deseados (riesgos, fallas, accidentes o desvíos de procedimiento) ocurridos durante el cambio de llantas. Es esencial que cualquier optimización implementada mantenga o mejore los estándares de seguridad existentes, sin incrementar la frecuencia de incidentes operativos.

Estas métricas actuarán como restricciones de control y serán monitoreadas paralelamente para garantizar que el impacto del proyecto sea positivo en términos globales, alineado con los principios de seguridad, calidad y sostenibilidad operativa.

**Figura 13**

*Tiempo parcial de cambio de llantas*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 14**

*Número de incidentes – periodo 2013 / 2014*



Fuente: Elaboración propia

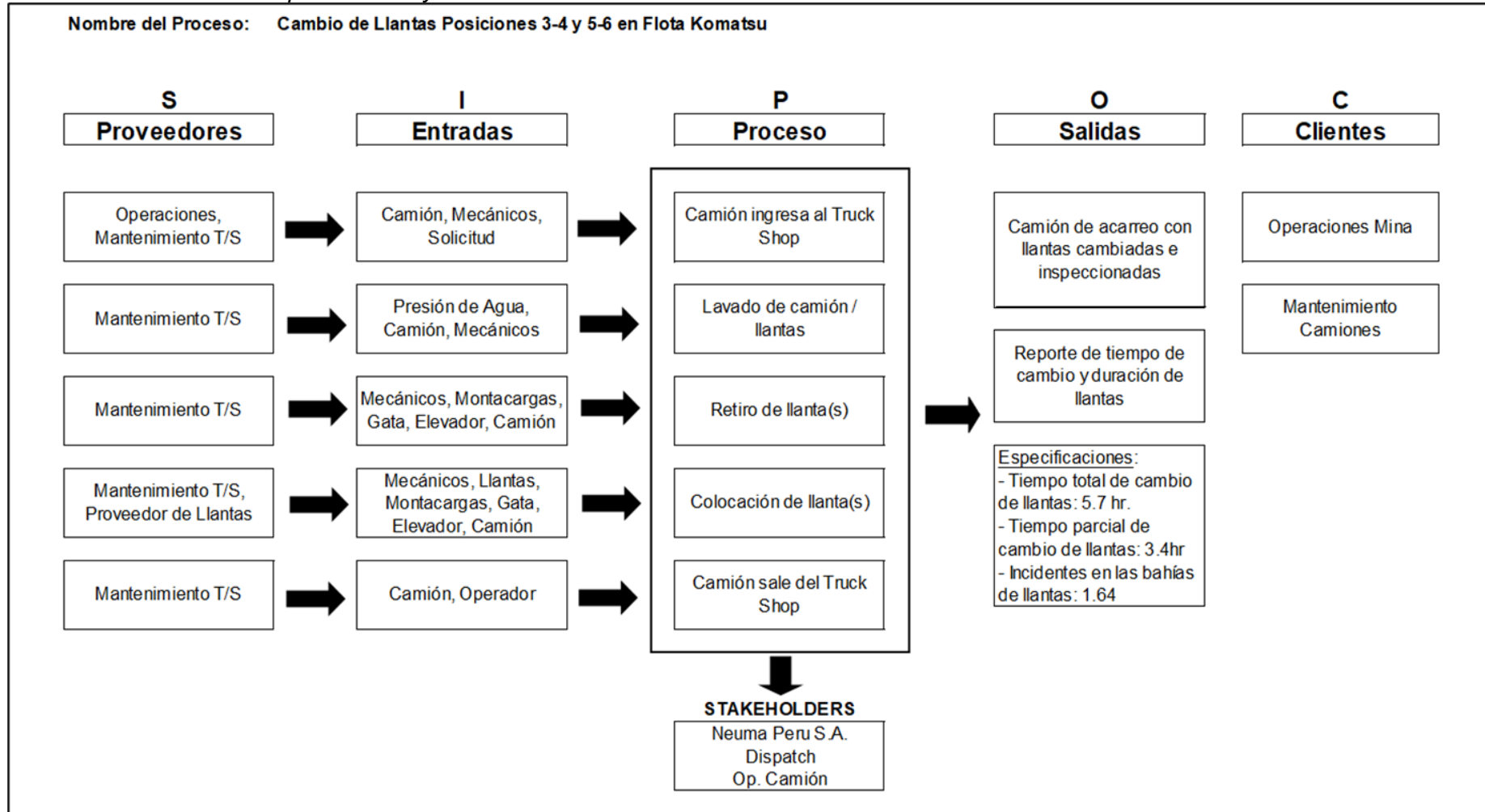
**3.2.1.5 SIPOC.** El diagrama SIPOC (acrónimo de Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers) es una herramienta fundamental en la fase Definir de la metodología Six Sigma, ya que permite visualizar de manera clara y estructurada los elementos clave del proceso objeto de análisis. Su elaboración facilita una comprensión general del flujo operativo y delimita los actores, insumos y entregables involucrados, desde el inicio hasta el cierre del proceso.

En el contexto de esta investigación, el SIPOC permitió representar gráficamente los límites del proceso de cambio de llantas, desde el momento en que el camión ingresa al área de mantenimiento hasta su salida rumbo a la operación minera o su reubicación dentro del taller. Este enfoque ayuda a identificar las entradas críticas, los proveedores internos, los puntos de control, las salidas del proceso y los clientes o usuarios finales que se ven afectados directa o indirectamente por el desempeño del sistema.

A través del SIPOC se estableció una visión integral del proceso, lo cual fue clave para alinear al equipo del proyecto en torno a un entendimiento común y asegurar que las mejoras propuestas se orientaran correctamente hacia los factores de mayor impacto.

**Figura 15**

*SIPOC – cambio de llantas posición 3-4 y 5-6 en camiones Komatsu*



Fuente: Elaboración propia

El gráfico SIPOC presentado resume de manera clara y estructurada el proceso de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de camiones de la flota Komatsu, proporcionando una visión integral de los elementos clave que intervienen en esta operación. A continuación, se comentan los aspectos más relevantes de este diagrama:

#### **Claridad del flujo del proceso.**

El SIPOC delimita adecuadamente el inicio y fin del proceso: desde el ingreso del camión al Truck Shop hasta su salida tras el cambio de llantas. Este enfoque permite visualizar los pasos críticos, como el lavado del vehículo, retiro y colocación de llantas, y garantiza que se consideren todos los factores involucrados en el tiempo total de ejecución.

#### **Identificación completa de actores y recursos.**

Los proveedores están correctamente definidos, incluyendo áreas operativas y de mantenimiento, así como el proveedor externo de llantas. Las entradas abarcan los recursos humanos (mecánicos, operador), equipos (montacargas, gato, elevador) y condiciones técnicas (presión de agua, solicitud de servicio), lo que evidencia un enfoque detallado de los insumos necesarios para el proceso.

#### **Precisión en las salidas y clientes.**

Las salidas del proceso no solo incluyen el resultado tangible (camión con llantas nuevas e inspeccionadas), sino también el reporte de tiempo, lo que vincula directamente el proceso con la necesidad de medición y mejora. Los clientes internos, como Operaciones Mina y Mantenimiento de Camiones, reflejan quiénes dependen del desempeño de esta tarea para garantizar la continuidad operacional.

#### **Inclusión de indicadores operativos clave.**

Se destacan tres especificaciones relevantes:

- Tiempo total de cambio: 5.7 horas
- Tiempo parcial: 3.4 horas
- Tasa de incidentes: 1.64 eventos

Estas cifras sirven como línea base para evaluar la efectividad de futuras mejoras, facilitando el seguimiento de los objetivos del proyecto.

## **Identificación de stakeholders.**

El gráfico también reconoce a los stakeholders clave (Neuma Perú S.A., Dispatch, Operador de Camión), lo cual es esencial para considerar los intereses de las partes que participan directa o indirectamente en el proceso.

## **3.2 Procesamiento de la información**

### **3.2.1 Six Sigma – etapa medir**

La fase Medir del ciclo DMAIC tiene como objetivo cuantificar el desempeño actual del proceso y establecer una línea base confiable para identificar oportunidades de mejora. En esta etapa se recopilan datos relevantes y se analizan visualmente las actividades reales ejecutadas en el cambio de llantas de la flota Komatsu.

Se utilizarán herramientas como el mapa de proceso para detallar las actividades involucradas y sus tiempos; el diagrama espagueti para identificar desplazamientos innecesarios dentro del área de trabajo; la metodología SMED para distinguir entre actividades internas y externas con miras a reducir el tiempo de intervención; y la identificación de desperdicios bajo el enfoque Lean, con el fin de eliminar actividades que no agregan valor.

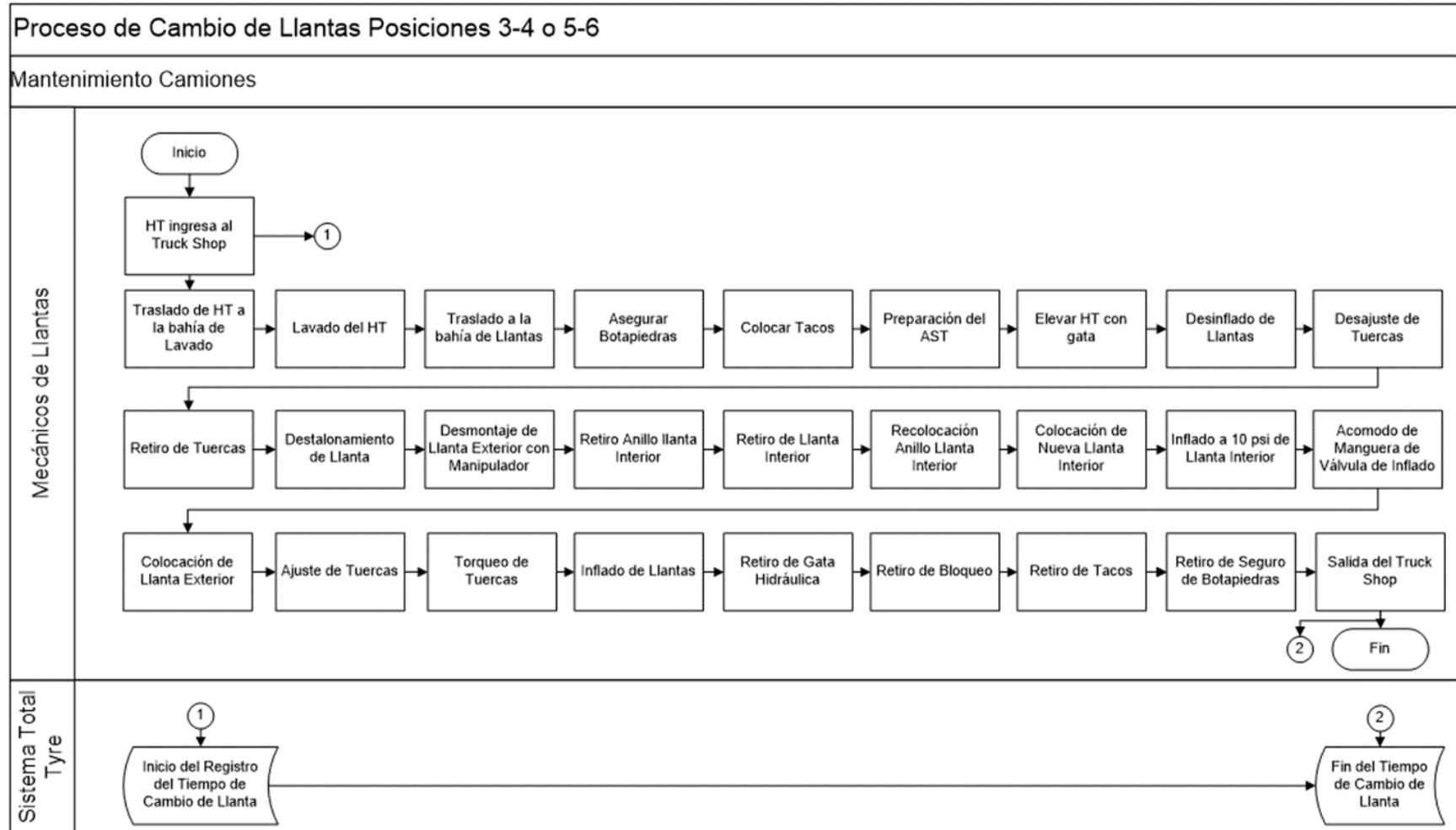
Estas herramientas permitirán comprender con precisión el estado actual del proceso y preparar el camino para un análisis técnico más profundo en la siguiente fase.

**3.2.1.1 Mapa de proceso.** El mapa del proceso permitió identificar y visualizar las 28 actividades que conforman el procedimiento de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones Komatsu. Desde el ingreso del camión al Truck Shop hasta su retorno a operaciones, se detallaron acciones operativas, técnicas y administrativas ejecutadas por distintas áreas involucradas.

Este mapeo sirvió como base para detectar posibles cuellos de botella, redundancias y oportunidades de mejora, facilitando el análisis posterior mediante herramientas como el diagrama espagueti y SMED. A continuación, se presenta la figura que detalla la secuencia completa de actividades del proceso.

**Figura 16**

*Mapa del proceso de cambio de llantas posición 3-4 y 5-6*



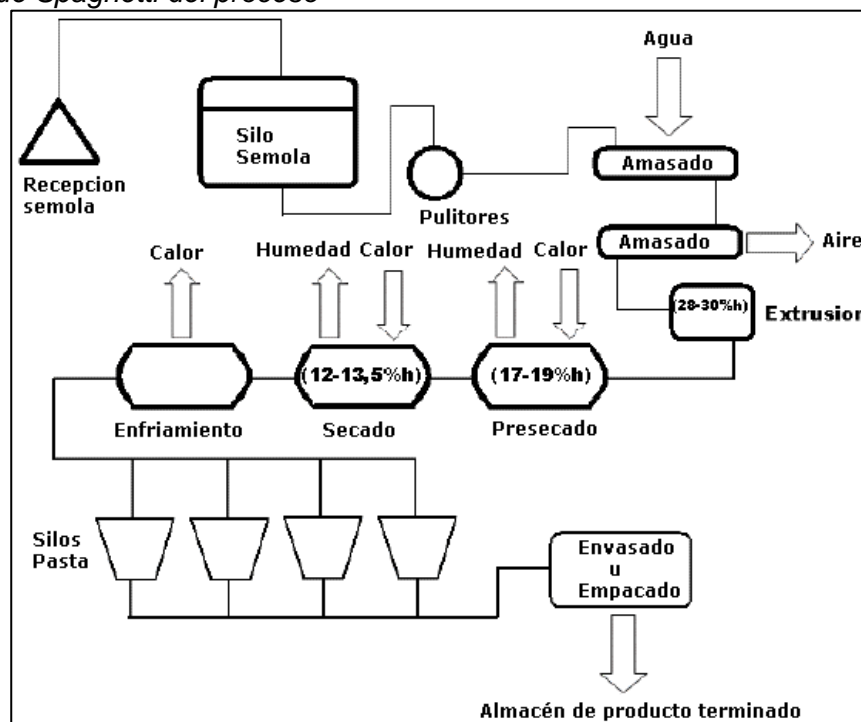
Fuente: Elaboración propia

**3.2.1.2 Diagrama Spaghetti.** Se elaboró un diagrama Spaghetti para visualizar los desplazamientos realizados por el equipo durante el proceso de cambio de llantas en posiciones 3-4 o 5-6. Esto permitió mapear de forma gráfica y directa la trayectoria recorrida por los técnicos desde que el camión ingresa al Truck Shop hasta su salida.

Durante la observación y recolección de datos, se estimó que el equipo de trabajo recorre aproximadamente 700 metros por cada evento de cambio de llantas. Este recorrido incluye movimientos hacia y desde zonas como: el área de lavado, el almacén de herramientas, la ubicación del gato hidráulico, el punto de inflado y el área de descarga de neumáticos.

**Figura 17**

*Diagrama de Spaghetti del proceso*



Fuente: Elaboración propia

Si bien el resultado mostró un recorrido significativo, no se identificaron desperdicios evidentes (como movimientos innecesarios, esperas prolongadas o transporte redundante), lo cual sugiere que los desplazamientos actuales están alineados con la disposición física del taller y las tareas asignadas. No obstante, este dato servirá como línea base para futuras propuestas de reconfiguración de layout o implementación de dispositivos de apoyo para reducir desplazamientos y fatiga operativa.

**3.2.1.3 SMED.** La aplicación de la metodología SMED permitió identificar que algunas actividades de preparación se realizaban recién cuando el camión ya estaba en la bahía, lo que generaba tiempos muertos y retrasos en el proceso. Estas tareas, como la disposición de herramientas o preparación del área, podían haberse realizado de forma anticipada.

El análisis evidenció la necesidad de diferenciar actividades internas y externas, promoviendo que las tareas externas se ejecuten antes de la llegada del equipo. Esta optimización permitiría reducir el tiempo total del cambio de llantas, mejorar la eficiencia operativa y eliminar desperdicios relacionados con la espera.

**Tabla 4**

*SMED del proceso*

PASOS	ACTIVIDAD	INTERNA	EXTERNA	MINUTOS
1	Preparar Herramientas		X	15
2	Preparar Llantas 3-4 y/o 5-6		X	40
3	Preparar Equipos Auxiliares (montacargas, manipulador)		X	10
4	Votar el desmonte de la tolva		X	10
5	Traslado a la zona de lavado		X	15
6	Bloqueo, colocan cadenas, lavan las llantas y desbloquean	X		30
7	Traslado a la bahía de llantas	X		10
8	Leer el PETS y preparar el AST	X		25
9	Evacuar el aire de las llantas y levantar equipo	X		25
10	Destorqueo y desajuste de tuercas 3-4 y/o 5-6	X		30
11	Desmontaje de llantas posteriores 3-4 y/o 5-6	X		10
12	Retirar seguros de las llantas internas 4 y/o 5	X		10
13	Destalonado de llantas 4 y/o 5	X		10
14	Retiro de las llantas 4 y/o 5	X		5
15	Limpieza y engrase de los espárragos	X		15
16	Montaje de la llanta 4 y/o 5	X		10
17	Instalación de los seguros 4 y/o 5	X		15
18	Inflar con Nitrógeno la llanta (20 PSI)	X		5
19	Montaje de la llanta 3 y/o 6	X		20
20	Ajuste de tuercas, torqueo e inflado de la llanta (120 PSI)	X		30
21	Bajar el equipo empleando el super Jack	X		5
22	Desbloqueo, retirar cadena y traslado del equipo	X		20
23	Traslado del camión de la operación al taller	X		25
24	Retorqueo de las llantas 3 y/o 6	X		45
25	Retorno del camión a la operación	X		25
26	Llevar la llanta para su reparación o eliminación		X	20
TOTAL		20	6	480

Fuente: Elaboración propia

**3.2.1.4 Identificación de desperdicios.** Durante la fase Medir del ciclo DMAIC, se emplearon herramientas como el Mapa de Procesos (MP), el Diagrama Spaghetti y el análisis SMED, con el objetivo de detectar actividades que no agregan valor al proceso de cambio de llantas en los camiones de la flota Komatsu. Estas herramientas permitieron identificar una serie de desperdicios relacionados con tiempos excesivos, reprocesos y demoras operativas.

A continuación, se presenta una lista de los principales desperdicios identificados, junto con la herramienta utilizada para su detección:

**Tabla 5**

*Identificación de desperdicios del proceso*

Nº	DESPERDICIO	HERRAMIENTA
1	Tiempo de lavado de llantas	MP
2	Tiempo de elaboración del AST	MP
3	Tiempo de eliminación de aire de las llantas	MP
4	Demora en retirar el botapiedra	MP
5	Retirar y colocar los 56 pernos	MP
6	Colocar los seguros del anillo y de las llantas	MP
7	Retorqueo de tuercas	MP
8	Tiempo de inflado de llantas	MP
9	Retiro del bloqueo y de las cuñas	MP

Fuente: Elaboración propia

Estos desperdicios representan actividades que prolongan innecesariamente el tiempo total del servicio, reduciendo la disponibilidad de los equipos en operación. Algunos de ellos, como el inflado de llantas o el torqueo de pernos, pueden ser susceptibles de mejora mediante tecnología (por ejemplo, equipos de torque automático o inflado programado), mientras que otros están vinculados a aspectos organizativos o de secuencia operativa.

La identificación de estos puntos críticos sienta las bases para la siguiente etapa, Analizar, en la cual se abordarán las causas raíz de cada desperdicio con miras a su eliminación o mitigación sistemática.

### **3.2.2 Six Sigma – etapa analizar**

Una vez identificados los principales desperdicios y cuellos de botella en la etapa anterior, el siguiente paso en la metodología Six Sigma es la fase Analizar, cuyo propósito es determinar las causas raíz que originan los problemas detectados en el proceso de cambio de llantas de la flota Komatsu.

Esta etapa se enfoca en comprender por qué ocurren las ineficiencias, aplicando un enfoque estructurado que permita respaldar las conclusiones con evidencia y datos objetivos. Para ello, se utilizan herramientas de análisis gráfico y estadístico que permiten visualizar tendencias, dispersión y relaciones entre variables del proceso. Posteriormente, se recurre a metodologías cualitativas como el Análisis de Causa Raíz (ACR) para profundizar en las verdaderas fuentes de variabilidad o pérdida de tiempo.

La etapa se divide en los siguientes componentes:

- Análisis gráfico de los datos recolectados para identificar patrones, anomalías o variabilidad significativa en el proceso.
- Análisis de causa raíz (ACR) utilizando herramientas como el diagrama de Ishikawa o los 5 Porqués para indagar las razones fundamentales detrás de cada desperdicio.
- Síntesis y resumen de las causas más relevantes, agrupándolas según su impacto en la métrica primaria.
- Validación de causas mediante observación directa, contraste con datos reales o retroalimentación del personal operativo, asegurando que las causas identificadas sean efectivamente las responsables de los problemas.

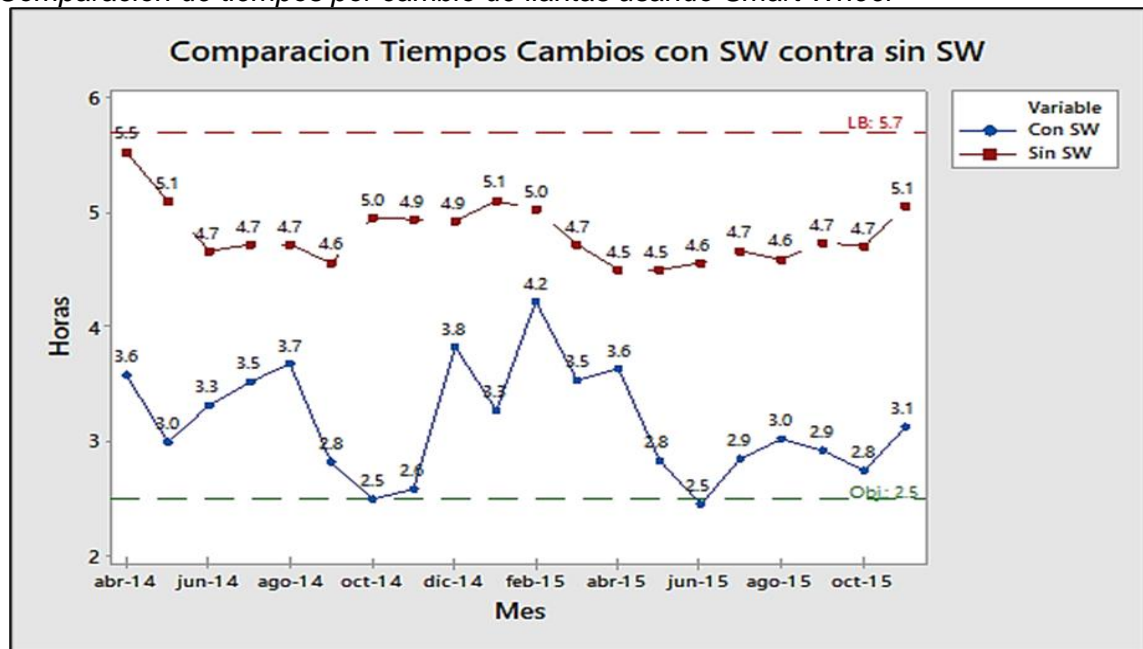
**3.2.2.1 Análisis gráfico.** Con el objetivo de visualizar y cuantificar el impacto de las diferentes configuraciones de aros en el tiempo total del cambio de llantas, se realizó un análisis comparativo entre aros convencionales y aros tipo Smart Wheel. Este análisis

gráfico permitió observar variaciones significativas en el rendimiento del proceso, evaluando la eficiencia operativa que aporta la tecnología Smart Wheel frente a los métodos tradicionales.

Para ello, se emplearon gráficos de barras y dispersión que representan el tiempo promedio de cambio para cada tipo de aro en las posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones de la flota Komatsu. Los resultados reflejaron que los aros Smart Wheel tienden a reducir notablemente el tiempo operativo requerido, debido principalmente a su diseño optimizado para facilitar la instalación y el desmontaje.

**Figura 18**

*Comparación de tiempos por cambio de llantas usando Smart Wheel*



Fuente: Elaboración propia

Además, el análisis evidenció una menor dispersión de los tiempos cuando se utilizan Smart Wheels, lo cual indica mayor uniformidad en el proceso y menos variabilidad entre turnos o técnicos. Esto respalda el potencial del uso de este tipo de componentes como parte de la estrategia de mejora continua, ya que no solo optimiza tiempos, sino que también aporta predictibilidad y control al proceso.

Este análisis sirvió como insumo clave para identificar una de las principales causas del exceso de tiempo en el procedimiento actual y fundamentar la necesidad de migrar hacia soluciones tecnológicas más eficientes.

**3.2.2.2 Análisis de causa raíz (ACR).** Luego de identificar los principales desperdicios a lo largo del proceso mediante el Mapa del Proceso y la metodología SMED, se procedió a realizar un Análisis de Causa Raíz (ACR) con el fin de profundizar en los factores que originan dichas ineficiencias. Esta etapa tuvo como propósito no solo registrar los síntomas del problema, sino también comprender las causas fundamentales que impiden una ejecución fluida y eficiente del cambio de llantas.

Para ello, se emplearon herramientas como el diagrama de Ishikawa (causa-efecto), aplicadas sobre cada una de las actividades identificadas con tiempos excesivos o alta variabilidad. Entre los elementos analizados se incluyeron: demoras en la preparación del equipo, tiempos prolongados en el inflado de llantas, procesos secuenciales no sincronizados y tareas que inician únicamente tras la llegada del camión, en lugar de ejecutarse de forma anticipada.

Gracias a este análisis, se logró vincular cada desperdicio con una o más causas raíz, tales como falta de estandarización en tareas previas, insuficiente organización de recursos auxiliares, o limitaciones del diseño de los componentes convencionales (como los aros tradicionales).

**Figura 19**

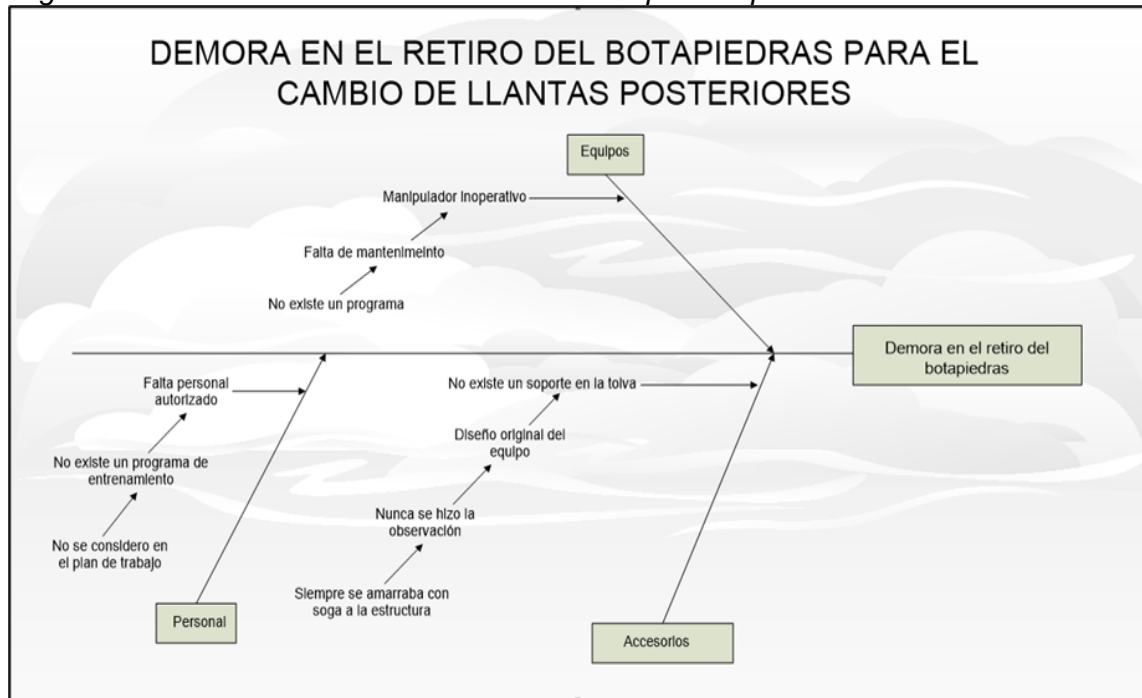
*Diagrama de Ishikawa – demora en eliminar aire en las llantas*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 20**

*Diagrama de Ishikawa – demora en retiro del botapiedras para cambio de llantas*



Fuente: Elaboración propia

**3.2.2.3 Resumen y validación de causas.** Luego de aplicar el análisis de causa raíz (ACR) a los principales desperdicios identificados en el proceso de cambio de llantas, se elaboró una lista detallada de causas fundamentales, acompañadas por su respectiva validación en campo. Esta revisión técnica permitió confirmar que las causas tienen un impacto directo en los tiempos del proceso y en su eficiencia operativa.

Estas observaciones fueron contrastadas con documentación técnica, reportes operativos y entrevistas con el personal de mantenimiento. Asimismo, se plantearon propuestas de mejora para cada caso, como actualizar los equipos, rediseñar puntos de aseguramiento, modificar procedimientos estándar y revisar la tipología de componentes utilizados.

Esta etapa no solo permitió validar las causas, sino también priorizar las acciones correctivas de mayor impacto para implementar en la siguiente fase del proyecto.

**Tabla 6***Validación de causas raíz de los desperdicios del proceso*

Nº	DESPERDICIOS	CAUSAS RAÍZ	VALIDACIÓN
1	Tiempo de lavado de llantas	Baja presión de agua	La presión del agua cae cuando la bahía de lavados está en uso
		Hidrolavadora no envía chorro a la distancia requerida	El lavado lo hace por aspersión y pierde fuerza a medida que se aleja
2	Tiempo de elaboración de AST	Procedimiento de mantenimiento	Es un estándar de mantenimiento
3	Tiempo de eliminación de aire de las llantas	Pitones y mangueras delgadas y zona con reducciones	Los pitones y mangueras son más delgados que los del CAT 797
		Línea de disipación con reducciones	Existen reducciones de 3/4" a 1/2"
4	Demora en retirar el botapiedra	No tiene un lugar adecuado para asegurar	Cada guardia lo acomoda donde lo ve conveniente
5	Retirar y colocar los 56 pernos	Tipo de aro	Parte del procedimiento de estos aros
6	Colocar los seguros del anillo y las llantas	Tipo de aro	Parte del procedimiento de estos aros
7	Retorqueo de las tuercas	Tipo de aro	Parte del procedimiento de estos aros
8	Tiempo de inflado de llantas	Generador de nitrógeno malogrado y compresor de baja presión	El generador está malogrado desde julio 2014
9	Retirar el bloqueo y cuñas	No hay otro dispositivo para asegurar el HT	No existe dispositivo permanente en el taller de llantas

Fuente: Elaboración propia

**3.2.3 Six Sigma – etapa mejorar**

La fase Mejorar (Improve) del ciclo DMAIC se enfoca en diseñar, validar e implementar soluciones que eliminen las causas raíz previamente identificadas, con el fin de reducir la variabilidad y mejorar el desempeño del proceso. En el contexto del presente proyecto, esta etapa busca optimizar el tiempo de cambio de llantas en posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones mineros, eliminando desperdicios y elevando la eficiencia operativa.

Durante esta fase, se abordarán tres componentes fundamentales:

- La identificación y selección de soluciones viables y sostenibles, enfocadas en atacar las principales causas que generan demoras y desperdicios;
- El desarrollo de un plan de implementación estructurado, que permita aplicar dichas soluciones de forma progresiva, eficaz y con bajo riesgo para la operación; y
- La ejecución del enfoque Just Do It, centrado en acciones de bajo costo pero alto impacto, como la disminución de los costos asociados a la recepción de nitrógeno,

lo cual contribuye tanto a la eficiencia económica como a la autonomía operativa del proceso.

En conjunto, estas acciones permitirán cerrar las brechas detectadas en la etapa de análisis y generar mejoras cuantificables en los indicadores clave del proceso, en línea con los objetivos estratégicos del proyecto.

**3.2.3.1 Identificación y selección de soluciones.** Una vez identificadas y validadas las causas raíz que generan desperdicios en el proceso de cambio de llantas, se procedió a formular un conjunto de soluciones específicas orientadas a eliminar o mitigar dichas causas. Estas ideas de mejora fueron evaluadas en función de su viabilidad técnica, facilidad de implementación, impacto esperado en la eficiencia del proceso y relación costo-beneficio.

Estas propuestas serán priorizadas en función de su impacto sobre el tiempo total del proceso, su alineamiento con los objetivos del proyecto y la disponibilidad de recursos para su ejecución.

**Tabla 7**

*Ideas propuestas para mejora del proceso*

Nº	DESPERDICIOS	CAUSAS RAÍZ	IDEAS PARA MEJORAMIENTO
1	Tiempo de lavado de llantas	Baja presión de agua	Usar bahía de lavado
		Hidrolavadora no envía chorro a la distancia requerida	Buscar boquillas adecuadas Adecuar voltaje de la Hidrolavadora
2	Tiempo de elaboración de AST	Procedimiento de mantenimiento	Elaborar hoja tipo check-list
3	Tiempo de eliminación de aire de las llantas	Pitones y mangueras delgadas y zona con reducciones	Probar en Komatsu los pitones y manguera del 797
		Línea de disipación con reducciones	Cambiar las reducciones de 1/2" a 3/4"
4	Demora en retirar el botapiedra	No tiene un lugar adecuado para asegurar	Mejorar el procedimiento del retiro del botapiedras
5	Retirar y colocar los 56 pernos	Tipo de aro	Usar aros SW
6	Colocar los seguros del anillo y las llantas	Tipo de aro	Usar aros SW
7	Retorqueo de las tuercas	Tipo de aro	Usar aros SW
8	Tiempo de inflado de llantas	Generador de nitrógeno malogrado y compresor de baja presión	Arreglar la planta de nitrógeno

Fuente: Elaboración propia

**3.2.3.2 Plan de implementación.** Tras identificar y seleccionar las soluciones orientadas a reducir los desperdicios en el proceso de cambio de llantas, se elaboró un plan detallado para asegurar su correcta ejecución. Este plan asigna responsables, establece fechas objetivo, determina apoyos requeridos, y monitorea el estado de implementación de cada acción. La información también incluye recursos adicionales necesarios y los indicadores que permiten verificar el éxito de las mejoras. Este enfoque estructurado busca garantizar que las soluciones adoptadas generen un impacto positivo y sostenido en la operación.

**Tabla 8**

*Ideas propuestas para mejora del proceso*

Desperdicio	Solución	Fecha Objetivo	Apoyo Requerido	Otros Recursos Adicionales	Estado de Actualización	Éxito Medido Por
	Usar bahía de lavado			Esperar la nueva bahía de lavado	Bahía lavado planificada	
Tiempo de lavado de llantas	Buscar boquillas adecuadas Adecuar voltaje de la hidrolavadora				Ya no va	Hidrolavadora funcionando
Tiempo de elaboración de AST	Hacer AST durante el desinflado de la llanta	mar-16			En consulta	Cambio funcionando
Tiempo de eliminación de aire de las llantas	Desconectar manguera cuando quede 25 PSI	mar-16	Salud y Seguridad		Se conversó con Marlon Romero, hay que avisar un día antes	Cambio aprobado
	Cambiar las reducciones de 1/2" a 3/4"	dic-15			Implementado	Cambio realizado
Demora en retirar el botapiedra	Mejorar el procedimiento del retiro del botapiedras	jul-14			Implementado	Procedimiento implementado
Retirar y colocar los 56 pernos		dic-15			Compra en proceso	Compra aprobada
Colocar los seguros del anillo y las llantas	Usar aros SW	dic-15	Logística, Compras		Compra en proceso	Compra aprobada
Retorqueo de tuercas		dic-15			Compra en proceso	Compra aprobada
Tiempo de inflado de llantas	Arreglar la planta de nitrógeno	ene-16	International Wheel		Se reparó y se volvió a malograr	Planta funcionando (parcial)

Fuente: Elaboración propia

**3.2.3.3 Just Do It: Disminuir los costos de recepción de nitrógeno.** Durante la etapa de mejora se detectó una oportunidad significativa para reducir los costos asociados al abastecimiento de nitrógeno, mediante una acción tipo “Just Do It”, enfocada en la eficiencia operativa sin necesidad de grandes inversiones.

Actualmente, solo el 46% de las descargas alcanzaban el volumen óptimo de más de 6,000 m<sup>3</sup>, requerido para acceder a la tarifa preferencial de 1.05 USD/m<sup>3</sup>. Esto representaba una pérdida potencial de ahorro en más del 50% de los abastecimientos. Se planteó como objetivo incrementar ese porcentaje al 80% de las descargas, optimizando tanto la logística como la planificación del consumo y reposición del recurso.

**3.2.3.3.1 Principales causas identificadas.**

- Falta de control del consumo diario de nitrógeno: no se lleva un registro que permita prever el momento óptimo para solicitar la recarga.
- Abastecimiento ineficiente por falta de espacio: la infraestructura actual limita la capacidad de recepción, lo que obliga a realizar pedidos menores.
- Procedimientos de trabajo desactualizados: la documentación y prácticas actuales no reflejan las mejores condiciones para optimizar la recepción.
- Ausencia de responsables durante la descarga: no hay una persona asignada que supervise y coordine el abastecimiento, generando fallas en la ejecución.
- Volumen de entrega inconsistente por parte del proveedor: se han registrado entregas por debajo de lo acordado, afectando la eficiencia del proceso.

Los precios que aplica el proveedor están directamente relacionados a la cantidad descargada, según la siguiente tabla.

**Tabla 9**

*Costo del nitrógeno por volumen requerido*

<b>CARGA DE NITRÓGENO (m<sup>3</sup>)</b>	<b>TARIFA BASE (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>TARIFA FINAL A COBRAR (USD/m<sup>3</sup>)</b>
6000 m <sup>3</sup> o más	1.05	1.05 (más económica)
5000 a 5999 m <sup>3</sup>	1.26	1.32
4000 a 4999 m <sup>3</sup>	1.57	1.74
3000 a 3999 m <sup>3</sup>	2.10	2.41
Menos de 3000 m <sup>3</sup>	2.10	2.52 (más costosa)

Fuente: Elaboración propia

### **3.2.3.3.2 Soluciones planteadas para optimizar la recepción de nitrógeno.**

Con base en las causas identificadas, se definió un conjunto de acciones prácticas orientadas a reducir los costos asociados al abastecimiento de nitrógeno. Estas soluciones buscan mejorar la planificación, gestión y eficiencia del suministro, asegurando el cumplimiento del volumen mínimo requerido (6000 m<sup>3</sup>) para acceder a la tarifa más baja:

#### **Nombramiento de responsables:**

Se asignarán encargados específicos para cada una de las tareas relacionadas con la recepción y monitoreo del nitrógeno, lo cual permitirá mejorar la trazabilidad, responsabilidad y ejecución oportuna del proceso.

#### **Actualización del procedimiento operativo:**

El procedimiento de trabajo será revisado y actualizado para reflejar las condiciones actuales, prácticas óptimas y responsabilidades claras. Esto contribuirá a la estandarización de actividades críticas y a evitar improvisaciones.

#### **Gestión de volumen en el tanque de recepción:**

Se establecerá un control estricto de los niveles del tanque para asegurar que cada abastecimiento cumpla el rango operativo óptimo que permita recibir al menos 6000 m<sup>3</sup>. Esto permitirá maximizar la eficiencia del costo unitario por descarga.

#### **Notificación oportuna a logística:**

Se implementará un sistema de aviso anticipado. Cuando la presión del tanque alcance las 40 pulgadas de agua, se notificará al área de Logística para coordinar el nuevo abastecimiento de forma planificada, evitando situaciones de urgencia o descargas incompletas.

#### **Prueba piloto con generador de nitrógeno:**

En colaboración con el equipo de llantas, se está llevando a cabo una prueba piloto que consiste en utilizar una planta generadora de nitrógeno in situ, lo cual permitiría prescindir de la dependencia externa y almacenar el gas en forma gaseosa para su posterior uso operativo. Esta iniciativa tiene el potencial de eliminar el costo de compra externa y transporte del nitrógeno.

**3.2.3.3.3 Beneficio.** A partir de la optimización en la estrategia de recepción de nitrógeno, se logró una mejora significativa en la eficiencia de abastecimiento. Antes de la implementación, solo el 46.16% de las descargas superaban los 6000 m<sup>3</sup>, accediendo a la tarifa más baja (1.05 US\$/m<sup>3</sup>). Posteriormente, este porcentaje se elevó al 87.46%, lo que permitió una notable disminución en el precio promedio del nitrógeno por metro cúbico.

- Precio promedio antes: 1.2881 US\$/m<sup>3</sup>
- Precio promedio después: 1.0839 US\$/m<sup>3</sup>
- Diferencia de costo evitado: 0.2042 US\$/m<sup>3</sup>

Considerando un consumo anual estimado de 286,454 m<sup>3</sup>, esta mejora en la gestión y en la negociación de las condiciones logísticas permitió alcanzar un ahorro anual de US\$ 58,506, como se muestra en el análisis comparativo.

Este resultado evidencia el impacto positivo de las acciones tipo Just Do It, enfocadas en aprovechar oportunidades operativas de bajo costo y rápida implementación, con beneficios financieros tangibles y sostenibles en el tiempo.

**Tabla 10**

*Just Do It – beneficio económico*

ETAPA	PRECIO (US\$/m <sup>3</sup> )	QTY.	% DEL TOTAL	CONTRIBUCIÓN EN EL PRECIO (US\$/m <sup>3</sup> )
Antes	1.05	40,054	46.16%	0.4846582
	1.32	33,371	38.46%	0.507625611
	1.74	9,710	11.19%	0.1947013
	2.41	3,641	4.20%	0.101120241
	Total	86,776		1.288105352
Después	1.05	39,665	87.46%	0.918313011
	1.32	5,688	12.54%	0.165549357
	1.74	0	0.00%	0.000000000
	2.41	0	0.00%	0.000000000
	Total	45,353		1.083862369
Consumo estimado 2014		286,454	Ahorro US\$/m <sup>3</sup>	0.204242983
			Ahorro US\$/año	58,506.2195

Fuente: Elaboración propia

### **3.2.4 Six Sigma – etapa controlar**

La fase Controlar representa la culminación del ciclo DMAIC y tiene como objetivo garantizar la sostenibilidad de las mejoras implementadas, asegurando que los resultados obtenidos no se deterioren con el tiempo. En esta etapa se diseñan mecanismos para mantener bajo control el proceso optimizado, anticiparse a posibles desviaciones y fomentar una cultura de mejora continua dentro del equipo operativo.

En el caso del proceso de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de la flota Komatsu, esta etapa es crucial para mantener los niveles de eficiencia logrados, evitar el retorno a los tiempos prolongados de intervención y sostener los beneficios económicos derivados de iniciativas como la reducción de los costos de recepción de nitrógeno y el uso de aros Smart Wheels.

Para ello, en este capítulo se presentan los siguientes componentes:

- **Plan de entrenamiento:**

Que busca capacitar al personal operativo y de mantenimiento en las nuevas prácticas, procedimientos actualizados y uso correcto de herramientas y equipos involucrados en el proceso.

- **Plan de monitoreo:**

Que define los indicadores clave de desempeño (KPIs), la frecuencia de evaluación, los responsables de seguimiento y los medios para recopilar y analizar datos de desempeño del proceso.

- **Plan de respuesta:**

Orientado a establecer acciones correctivas rápidas ante posibles desviaciones, con protocolos definidos para asegurar una reacción oportuna y eficaz.

- **Comprobación de la mejora:**

Donde se evidencia el impacto positivo de las acciones implementadas mediante el análisis comparativo entre los datos previos y posteriores al proyecto, validando así la eficacia del plan de control.

Con estos pilares, se busca asegurar que el proceso permanezca estable y optimizado en el largo plazo, promoviendo una operación más segura, eficiente y rentable.

**3.2.4.1 Plan de entrenamiento.** Se presenta un plan estructurado de capacitaciones esenciales para consolidar los cambios implementados en el proceso de cambio de llantas. Se destacan los siguientes puntos:

**Cobertura del personal:**

Todos los entrenamientos están dirigidos a los Mecánicos de Llantas, lo cual es apropiado ya que este grupo es el actor principal en la ejecución de los procedimientos optimizados. Esta cobertura asegura una correcta adopción de las mejoras operativas.

**Contenidos alineados con mejoras implementadas:**

Cada sesión de entrenamiento está directamente relacionada con una solución propuesta durante la etapa “Mejorar”. Por ejemplo:

- La elaboración del AST durante el desinflado responde a la iniciativa de optimizar tiempos muertos.
- El procedimiento de aseguramiento de botapiedras y colocación de aros Smart Wheel responde a causas raíz y propuestas validadas.

**Material de soporte:**

El material necesario se reduce a instructivos técnicos o procedimientos ya aprobados. Esto indica que no se requieren grandes inversiones para el entrenamiento, solo la correcta difusión y uso del material disponible.

**Responsables definidos:**

Se asignan responsabilidades claras tanto a nivel operativo (supervisores de llantas) como a nivel de gestión (Armando Moyonero como responsable permanente), lo cual favorece la sostenibilidad del conocimiento y la continuidad operativa.

**Fechas de implementación:**

Los plazos definidos (marzo 2016 y julio 2014) muestran que algunas iniciativas ya han sido calendarizadas y/o ejecutadas, lo cual refuerza el compromiso con el plan de

control. Sin embargo, sería recomendable verificar si los entrenamientos con fecha vencida fueron efectivamente realizados y si es necesario actualizarlos o reforzarlos.

**Tabla 11**

*Plan de entrenamiento para mejorar el proceso*

<b>Entrenamiento necesario</b>	<b>Quién debe asistir</b>	<b>Material necesario</b>	<b>Responsabilidad de corto plazo</b>	<b>Responsabilidad permanente</b>	<b>Fecha para completar</b>
Elaboración del AST durante el desinflado de llantas	Todos los Mecánicos de Llantas	Ninguno	Supervisores de Llantas	Armando Moyonero	marzo-16
Desinflado de llantas cuando queden 25 psi	Todos los Mecánicos de Llantas	Instructivo de desinflado de llantas	Supervisores de Llantas	Armando Moyonero	marzo-16
Procedimiento de aseguramiento de botapiedras	Todos los Mecánicos de Llantas	Instructivo de Aseguramiento de Botapiedras	Supervisores de Llantas	Armando Moyonero	julio-14
Procedimiento de colocación de aros Smart Wheel	Todos los Mecánicos de Llantas	Procedimiento Aprobado	Supervisores de Llantas	Armando Moyonero	julio-14

Fuente: Elaboración propia

**3.2.4.2 Plan de monitoreo.**

- **Indicador clave:** El tiempo de cambio de llantas es el parámetro crítico de monitoreo, lo que reafirma su rol como métrica primaria del proyecto.
- **Fuente confiable de datos:** Se utiliza el sistema Total Tyre como base de datos oficial, lo cual garantiza objetividad y trazabilidad en el seguimiento.
- **Frecuencia mensual:** Esta periodicidad permite observar tendencias, controlar la sostenibilidad de las mejoras e implementar acciones correctivas si es necesario.
- **Responsables definidos:** Se asigna la responsabilidad del monitoreo a supervisores de llantas, asegurando continuidad y compromiso operativo.
- **Límite de actuación:** El umbral de  $\geq 4.23$  horas actúa como punto de control para alertas. Superar este valor activa la necesidad de acciones correctivas o ajustes operacionales.
- **Supervisión estratégica:** Armando Moyonero mantiene la supervisión del proceso, reforzando la autoridad técnica sobre el cumplimiento del estándar establecido.

### **3.2.4.3 Plan de respuesta.**

#### **Actuador permanente:**

- Indicador seleccionado: Tiempo de cambio de llantas.
- Importancia: Es la métrica principal del proyecto, directamente relacionada con los objetivos de eficiencia.

#### **Especificaciones superior e inferior:**

- Límite establecido: Tiempo promedio  $\geq 4.3$  horas.
- Justificación: Este umbral permite detectar desviaciones significativas del rendimiento esperado. Funciona como parámetro de control para asegurar la eficiencia sin comprometer la seguridad ni la calidad.

#### **Acciones ante desviaciones:**

- Medida correctiva: “Revisar el proceso” es una acción acertada, ya que permite detectar causas de incremento en el tiempo y ajustar actividades operativas o condiciones del entorno.

#### **Responsables de acción:**

- Supervisores de llantas: Responsables de ejecutar y documentar las medidas correctivas inmediatas.

#### **Proceso de escalamiento:**

- Armando Moyonero: Figura clave en la supervisión estratégica. Si las acciones iniciales no resuelven la desviación, él interviene como nivel superior de escalamiento para definir estrategias adicionales o asignar recursos.

#### **Responsabilidad de revisión:**

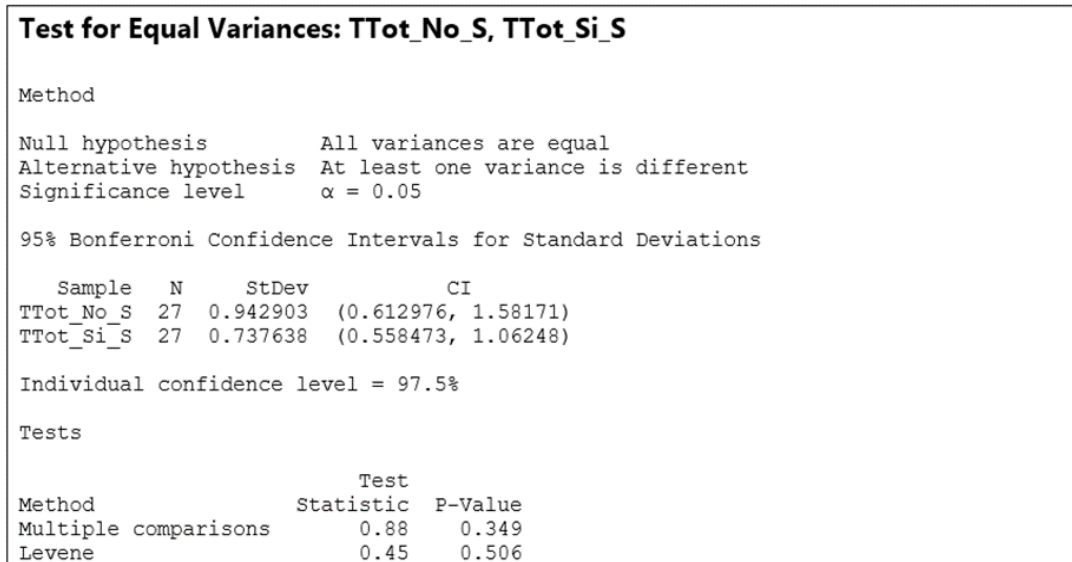
- Supervisores de llantas: Su rol continuo garantiza seguimiento regular, lo que cierra el ciclo de control y promueve la mejora continua.

**3.2.4.4 Comprobación de la mejora.** Para validar estadísticamente la efectividad de las mejoras implementadas en el proceso de cambio de llantas (posiciones 3-4 y 5-6), se aplicó una prueba estadística de comparación de medias, específicamente

el Test 2 Sample T. En la siguiente figura se muestra los resultados obtenidos con el software Minitab.

**Figura 21**

*Test for Equal Variances*



Fuente: Elaboración propia

El Test for Equal Variances evalúa si dos (o más) grupos tienen varianzas estadísticamente iguales. Esto es importante, por ejemplo, antes de aplicar pruebas t para medias, ya que muchas de ellas asumen igualdad de varianzas.

- Hipótesis nula ( $H_0$ ): Todas las varianzas son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Al menos una varianza es diferente.
- Nivel de significancia:  $\alpha = 0.05$ .

Ambos grupos tienen tamaños de muestra iguales. Los intervalos de confianza de las desviaciones estándar se superponen, lo que ya sugiere que las varianzas no son claramente diferentes.

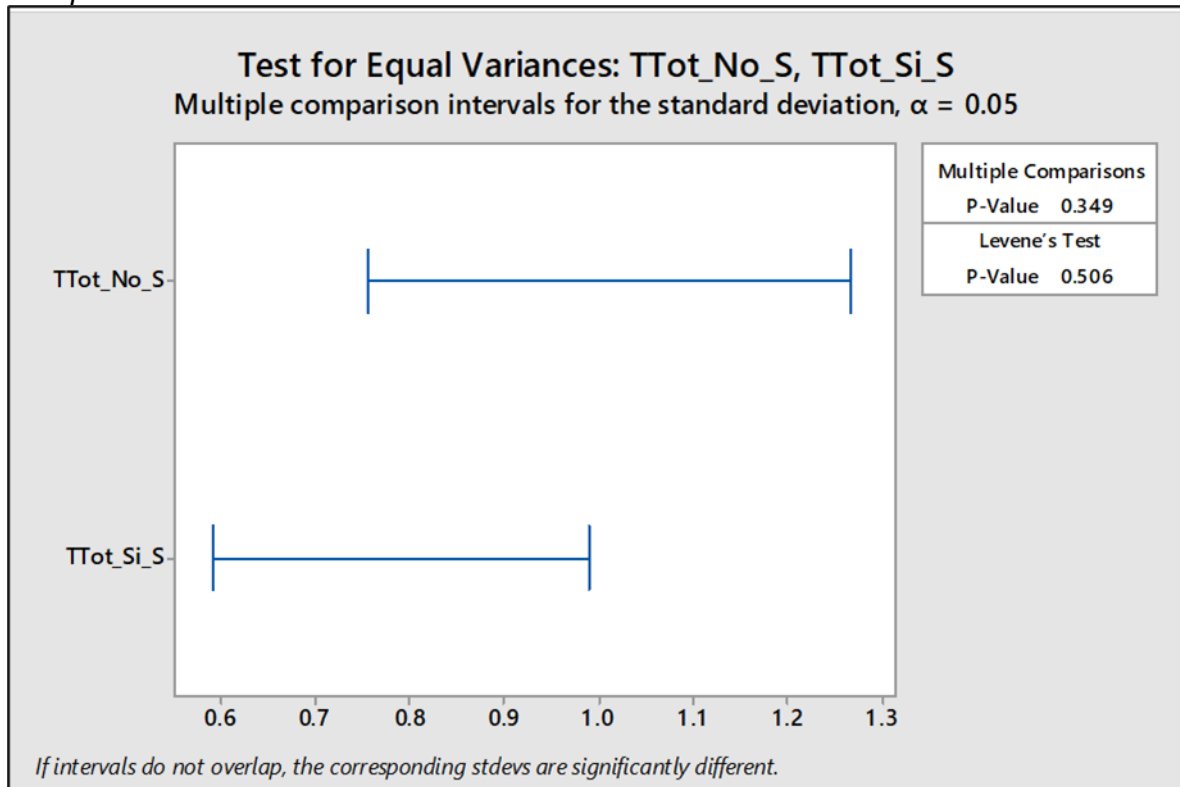
- Multiple comparisons test: Estadístico: 0.88 – P-valor: 0.349
- Prueba de Levene: Estadístico: 0.45 – P-valor: 0.506

En conclusión:

Las pruebas respaldan que las varianzas pueden ser consideradas iguales, lo cual permite usar procedimientos que suponen homogeneidad de varianzas, como el t-test para medias con varianzas iguales si es el siguiente paso en el análisis.

**Figura 22**

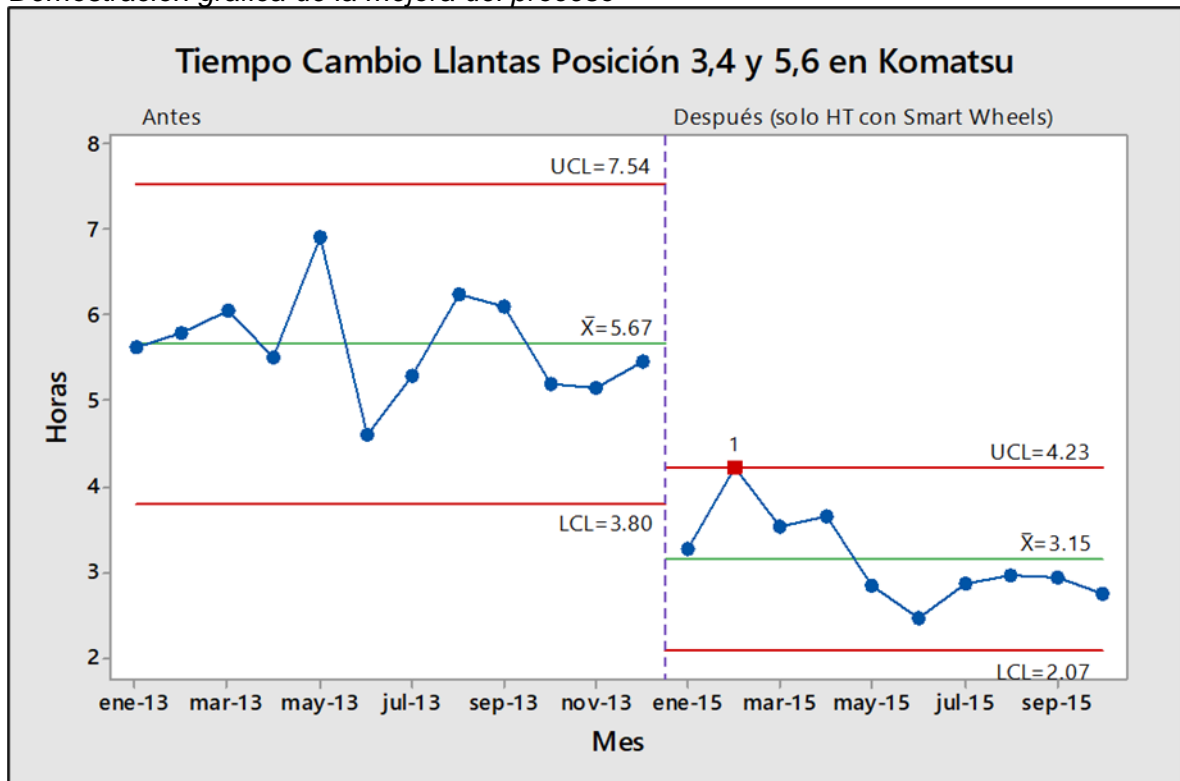
*Comparación de varianzas de las muestras*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 23**

*Demostración grafica de la mejora del proceso*



Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

### 4.1 Evaluación de resultados

Como parte final del ciclo de mejora, se realizó una evaluación comparativa del tiempo de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6, antes y después de la implementación de las soluciones propuestas. Este análisis permite validar cuantitativamente el impacto del proyecto en uno de los indicadores clave de desempeño (KPI).

En la siguiente tabla se muestra el tiempo promedio por cambio de llantas durante el periodo junio-2014 al octubre-2015. Periodo donde se implementó progresivamente los planes de acción determinados en el capítulo anterior.

**Tabla 12**

*Resumen de tiempos promedio por cambio de llantas posición 3-4 y 5-6*

Mes	TTot_Sin_SW (LINEA BASE)	TTot_Con_SW (MEJORA)
Jun-14	5.2	2.8
Jul-14	5.1	3.3
Ago-14	4.9	3.6
Set-14	4.8	2.8
Oct-14	5.5	3.1
Nov-14	5.7	2.6
Dic-14	5.5	3.7
Ene-15	5.6	4.0
Feb-15	5.6	3.3
Mar-15	5.5	3.4
Abr-15	5.4	3.4
May-15	4.8	3.1
Jun-15	5.1	2.4
Jul-15	4.7	2.5
Ago-15	4.9	2.9
Set-15	4.8	3.2
Oct-15	4.5	3.0

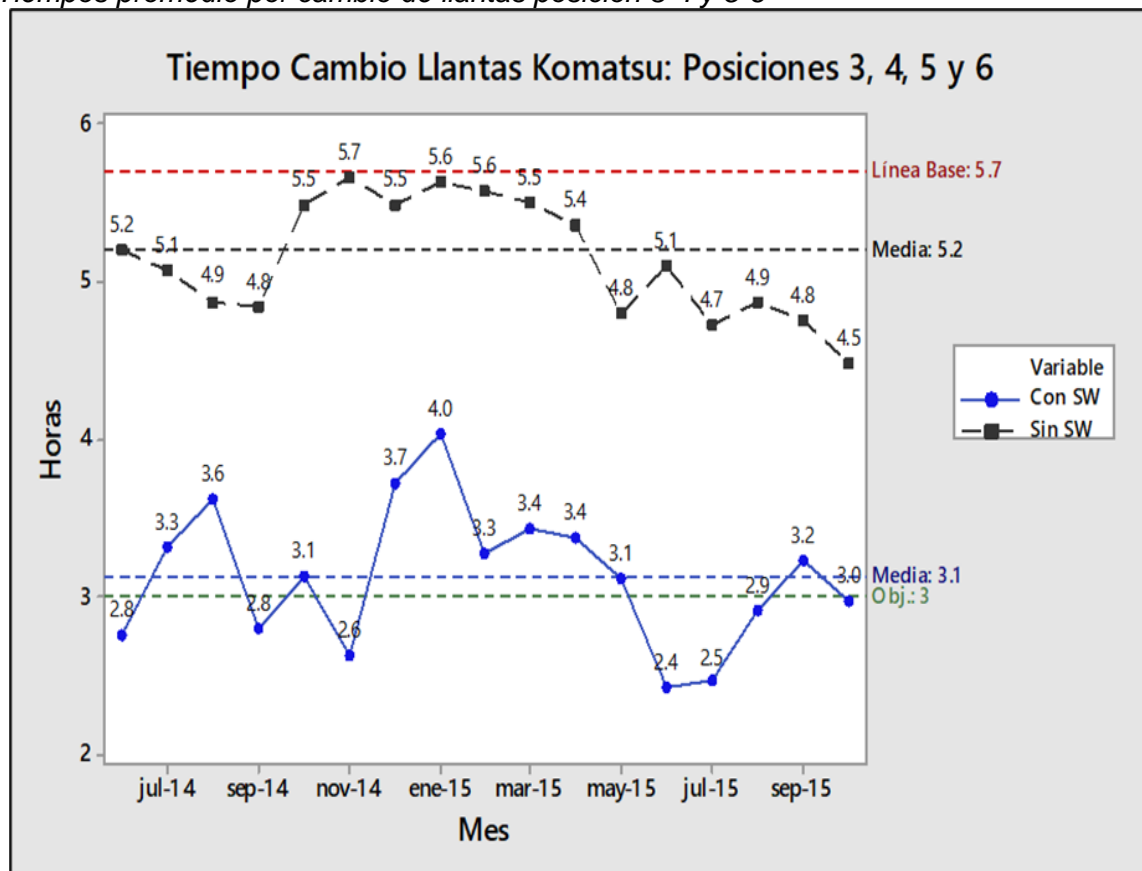
Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran una reducción significativa del tiempo promedio, pasando de 5.2 horas en la línea base a 3.1 horas en el escenario mejorado. Esta mejora refleja no solo un aumento en la eficiencia operativa, sino también una optimización de recursos y una mayor disponibilidad de equipos para la operación minera.

En la siguiente figura se aprecia con mayor claridad la reducción de tiempo de cambio de llantas.

**Figura 24**

*Tiempos promedio por cambio de llantas posición 3-4 y 5-6*



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2 Evaluación económica

Como resultado de la reducción en el tiempo de cambio de llantas mediante la implementación de aros Smart Wheel, se ha logrado una disminución significativa en el tiempo de inactividad de camiones, lo cual se traduce directamente en una mayor disponibilidad operativa.

**Tabla 13***Beneficio económico obtenido por las mejoras del proceso*

<b>VARIACION KPI'S</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Tiempo de cambio sin Smart Wheel - Línea Base	308.5	min/cambio
Tiempo de cambio con Smart Wheel - Logro	187.8	min/cambio
Tiempo adicional a la operación	162.4	hr/mes
Horas adicionales de operación al año	1,948.6	hr/año
<b>PRECIOS Y DRIVERS</b>		
Producción horaria de Camiones (Kom)	395	ton/hr
Material Adicional Movido	769,681	ton/año
Proporción de Mineral Movido a Concentradora [5YP]	17.7%	%
<b>ESTIMACIÓN BENEFICIO ECONÓMICO ANUAL</b>	<b>6,180,392</b>	<b>US\$/año</b>

Fuente: Elaboración propia

**Resumen de resultados:**

- Tiempo de cambio con aros convencionales: 308.5 min/cambio
- Tiempo de cambio con aros Smart Wheel: 187.8 min/cambio
- Tiempo adicional recuperado: 162.4 horas por mes
- Horas adicionales de operación al año: 1,948.6 hr/año

**Factores económicos considerados:**

- Producción horaria promedio por camión Komatsu: 395 ton/hr
- Material adicional movilizado gracias al tiempo ganado: 769,681 ton/año
- Proporción de mineral que va a la concentradora (5YP 2015): 17.7%

**Estimación del beneficio económico anual:**

Basado en los factores anteriores y siguiendo los supuestos del plan quinquenal (5YP 2015), se estima que el beneficio económico anual por incremento de disponibilidad alcanza: US\$ 6,180,392 / año

Este beneficio se suma al obtenido por la optimización de costos de recepción de nitrógeno, consolidando el impacto positivo del proyecto desde el enfoque financiero y operacional.

### 4.3 Validación de hipótesis

Para este análisis empezamos planteando las hipótesis nula y alternativa.

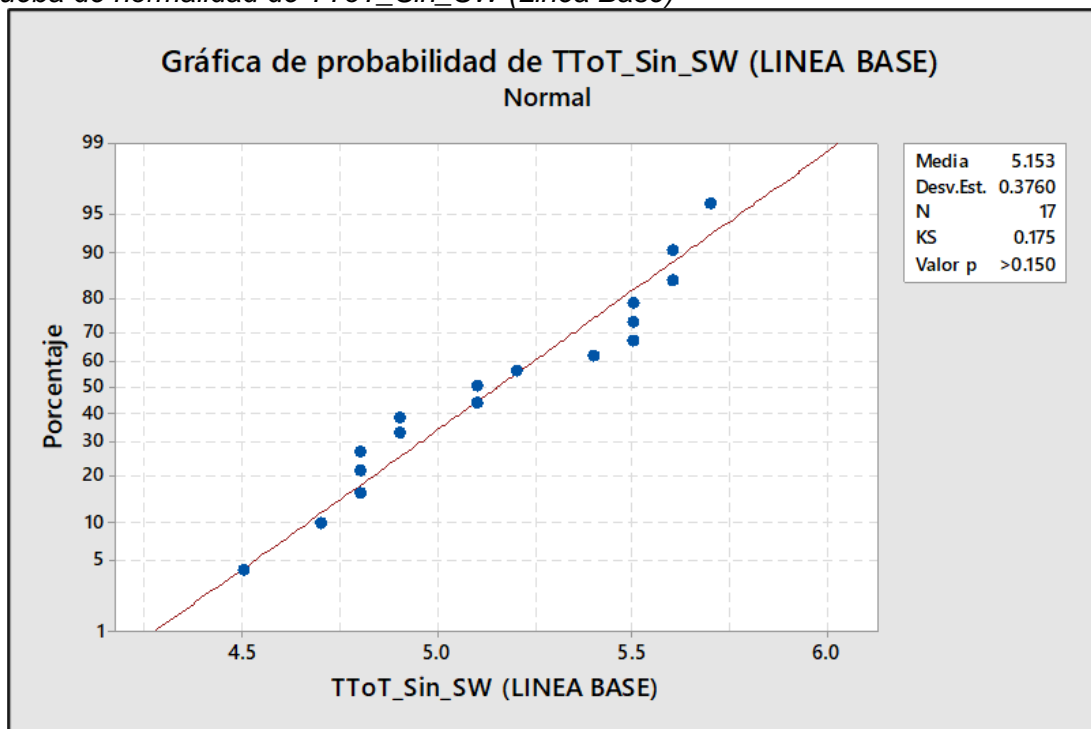
- $H_0$ : La implementación de soluciones tecnológicas en el proceso de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones Komatsu no permitirá reducir el tiempo de ejecución a 3 horas.
- $H_A$ : La implementación de soluciones tecnológicas en el proceso de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones Komatsu permitirá reducir el tiempo de ejecución a 3 horas.

Los datos a analizar son el promedio del tiempo de cambio de llanta sin SW (TToT\_Sin\_SW) y el promedio con SW (TToT\_Con\_SW), los cuales se mostraron en la tabla 12.

Empezamos realizando la prueba de normalidad para ambas muestras, al tener un nivel de confianza del 95%, para afirmar que las muestras son normales, el valor de p debe ser mayor a 0.05.

**Figura 25**

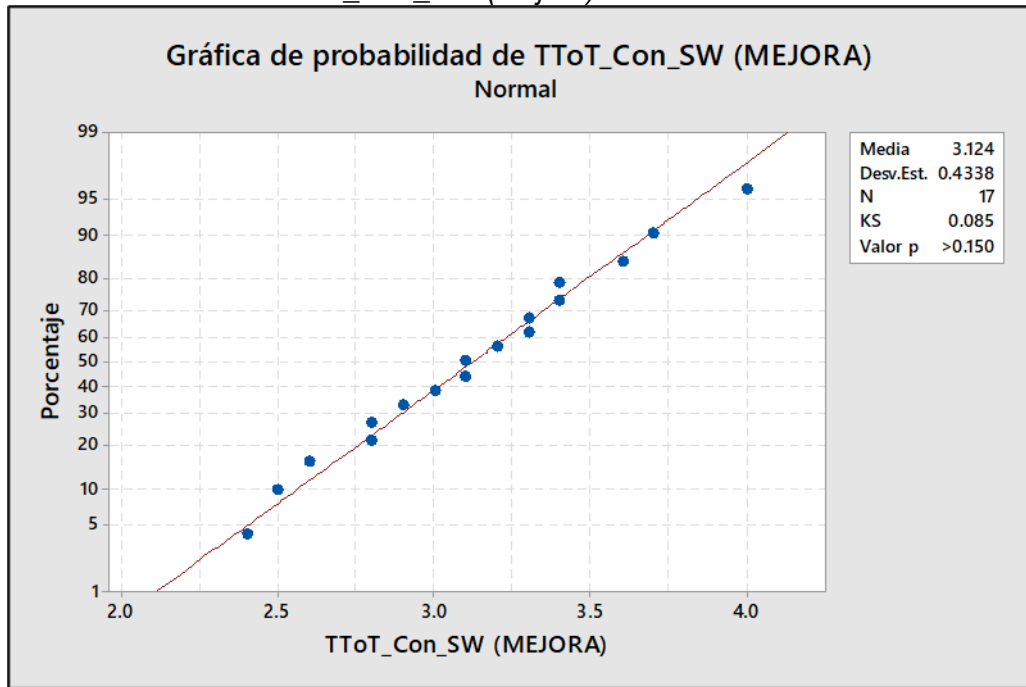
*Prueba de normalidad de TToT\_Sin\_SW (Linea Base)*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 26**

*Prueba de normalidad de TToT\_Con\_SW (Mejora)*

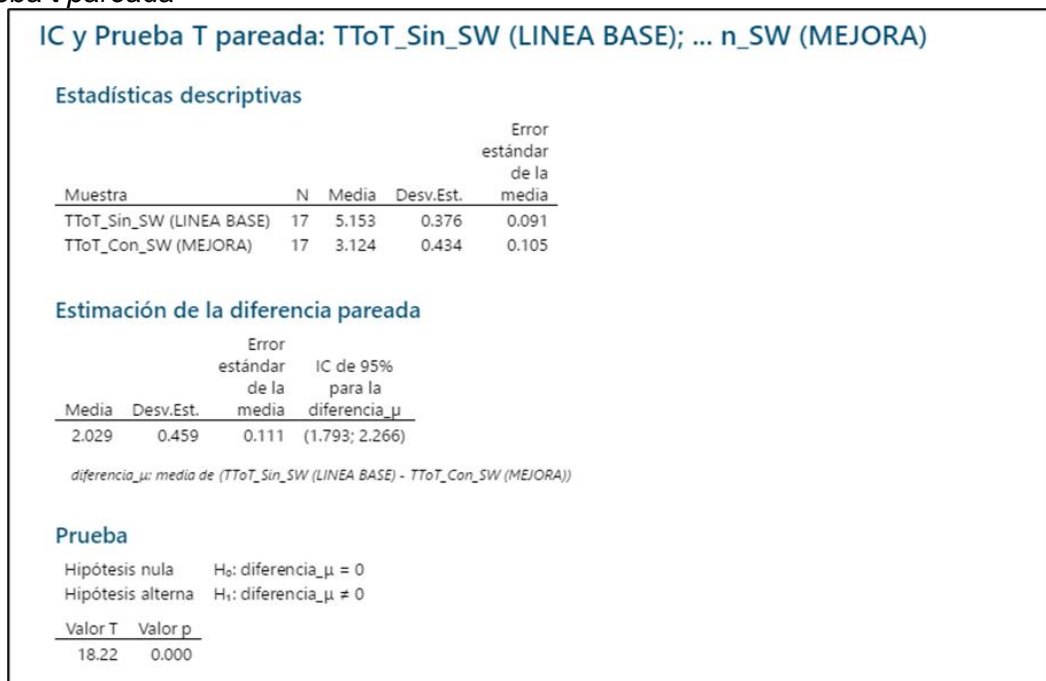


Fuente: Elaboración propia

Al tener ambas muestras con distribución normal, procedemos a realizar la prueba t pareada, con un nivel de confianza de 95% y N° de datos por muestra de 27. Para rechazar la hipótesis nula el valor de p debe ser menor a 0.05, tenemos.

**Figura 27**

*Prueba t pareada*



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa un valor de  $p = 0.000$ , por lo que podemos rechazar la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna. Por lo tanto, la implementación de soluciones tecnológicas en el proceso de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de los camiones Komatsu permitirá reducir el tiempo de ejecución a 3 horas.

## Conclusiones

La implementación de soluciones tecnológicas orientadas al mejoramiento del proceso de cambio de llantas en las posiciones 3-4 y 5-6 de la flota Komatsu ha demostrado ser una estrategia efectiva para alcanzar objetivos operacionales clave en el contexto minero.

A través del análisis de datos y el enfoque Six Sigma, se logró reducir el tiempo promedio de cambio de llantas a 3.1 horas, muy cercano al objetivo establecido de 3.0 horas. Esta mejora representa una reducción sustancial respecto a los valores históricos, los cuales superaban consistentemente las 5 horas en condiciones sin intervención.

La disminución del tiempo de intervención directa sobre los equipos permitió un aumento tangible en la disponibilidad de la flota, sin comprometer la seguridad de los trabajadores ni la integridad operativa del proceso. Este aspecto es clave para asegurar la continuidad y eficiencia en operaciones de alto volumen.

Con base en las estimaciones derivadas del 5YP 2015, se calcula un beneficio financiero anual potencial de aproximadamente US\$ 6'180,392, producto del incremento en la disponibilidad de camiones gracias a la reducción en tiempos de cambio de llantas. Este resultado reafirma el valor económico de aplicar soluciones tecnológicas inteligentes a procesos críticos.

La solución desarrollada no solo demuestra resultados cuantificables, sino que además establece un modelo replicable para otras actividades de mantenimiento o logística minera. Su implementación puede escalarse a otras áreas de la operación, contribuyendo a una cultura organizacional orientada a la mejora continua.

En resumen, se valida que la optimización de procesos mediante tecnología no solo es viable, sino también estratégica en contextos de alta demanda operativa como la minería. El balance entre eficiencia, seguridad y retorno económico constituye el principal logro de esta intervención.

## **Recomendaciones**

Formalizar y documentar el proceso mejorado como un estándar operativo para toda la organización. Esto permitirá reducir la variabilidad entre turnos y operadores, asegurar la sostenibilidad de los resultados y facilitar la capacitación del personal en futuras implementaciones.

Dado el impacto positivo de esta intervención, se recomienda replicar el enfoque de optimización tecnológica en otras tareas de mantenimiento recurrente o cuellos de botella operativos, tales como cambios de componentes mayores, lubricación de sistemas o gestión de herramientas.

Establecer un sistema de seguimiento mensual que permita evaluar tiempos reales de intervención, disponibilidad de equipos y condiciones de seguridad. Este monitoreo continuo fomentará la mejora continua y permitirá detectar desviaciones tempranamente.

## Referencias bibliográficas

- Albliwi, S.A., Antony, J., Lim, S.A. & Al-Mashari, M. (2015) '*A systematic review of Lean Six Sigma for the manufacturing industry*', Business Process Management Journal.
- Aldairi, J., Khan, M. & Munive-Hernandez, J. (2015) '*A Conceptual Model for a Hybrid Knowledge-based Lean Six Sigma Maintenance System for Sustainable Buildings*', Proceedings of the World Congress on Engineering (Vol. 2).
- Alsubaie, B. H. (2016). *Optimization oriented lean six sigma development for maintenance optimization in fleet vehicles* [Tesis de maestría, Brunel University London]. e <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/12851/1/FulltextThesis.pdf>
- Antony, J. (2008) '*Can Six Sigma be effectively implemented in SMEs?*', International journal of productivity and performance management.
- Antony, J., Kumar, M. & Tiwari, M. (2005) '*An application of Six Sigma methodology to reduce the engine- overheating problem in an automotive company*', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.
- Apte, U. & Kang, K. (2006) '*Lean Six Sigma for reduced cycle costs and improved readiness*', Technical Report NPS-LM-06-033, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- Box, G., Bisgaard, S. & Fung, C. (1988) *An explanation and critique of Taguchi's contributions to quality engineering*, Quality and Reliability Engineering International.
- Coronado, R. S. & Gálvez, M. (2023). *Aplicación de Six Sigma para la mejora de la productividad del área de mantenimiento de una empresa minera, Ica* [Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola] <https://hdl.handle.net/20.500.14005/15376>


- Deming, W.E. (2000) *The new economics: for industry, government, education*. Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, MA.
- Dhillon, B.S. (2006) *Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*. New York: Taylor & Francis.
- English, J. & Taylor, G. (1993) 'Process capability analysis—a robustness study', International Journal of Production Research.
- George, M.L. (2002) *Lean six sigma: combining six sigma with lean speed*, McGraw-Hill New York, NY.
- Hia, S. W., & Singgih, M. L. (2025). *Improving Tire Lifespan Using the Six Sigma Approach: A Case Study in a Coal-Hauling Company*. Management and Production Engineering Review, 16(1). <https://doi.org/10.24425/mper.2025.153930>
- Hia, S. W., Singgih, M. L., & Gurning, R. O. S. (2024). *The application of lean six sigma to improve mining transportation overall vehicle effectiveness (MTOVE): a case study in mining company*. International Journal of Lean Six Sigma, 16(1), 54–88. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-07-2023-0121>
- Indura (Grupo Air Products). (2025). *Innovador sistema de inflado de neumáticos con nitrógeno en faenas mineras peruanas*. Revista Tecnología Minera. <https://tecnologiaminera.com/noticia/presentan-innovador-sistema-de-inflado-de-neumaticos-con-nitrogeno-y-soluciones-de-oxigenacion-en-altura-1745613630>
- McClusky, R. (2000) *The rise, fall and revival of Six Sigma quality*, Measuring Business Excellence.
- Meeker, W.Q. & Escobar, L.A. (2003) *Reliability: the other dimension of quality*, Quality Technology & Qualitative Management.
- Minaya, M. A. (2021). *Implementación de la metodología Six Sigma para mejorar la vida útil de neumáticos de camiones mineros en el proyecto mina Justa* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/13400>

- Montgomery, D.C. (2009) *'Statistical Quality Control-A Modern Introduction, 6 ed. International Student Version John Wiley & Sons', Inc., New York.*
- Nelson, W. (1982) *'Applied Life Data Analysis, New York: John Wiley & Sons. Nelson, W.B. (2005). Applied life data analysis (Vol. 577). John Wiley & Sons.*
- Nicholas, J.M. (1998) *Competitive manufacturing management: continuous improvement, lean production, customer-focused quality.* Boston: McGraw-Hill/Irwin.
- Núñez, M. H. (2017). *Análisis y propuesta de mejora en la gestión de mantenimiento de una flota de camiones mineros con la aplicación del Six Sigma* [Tesis de pregrado. Universidad Católica San Pablo].  
<http://repositorio.ucsp.edu.pe/handle/UCSP/15545>
- Pfeifer, T., Reissiger, W. and Canales, C. (2004) *'Integrating six sigma with quality management systems', The TQM Magazine.*
- Pophaley, M. & Vyas, R.K. (2015) *'Fortification of plant maintenance management practices: role of six sigma approach', Brazilian Journal of Operations & Production Management.*
- Şenvar, Ö. & Tozan, H. (2010) *'Process capability and six sigma methodology including fuzzy and lean approaches', Products and Services; from R&D to Final Solutions.*
- Tabikh, M. & Khattab, A. (2011) *'Scheduled maintenance policy for minimum cost: a case study', Linnaeus University.*
- Taguchi, G. (1986) *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes.* Asian Productivity Organization, Tokyo.
- Taguchi, G. and Wu, Y. (1979) *Introduction to off-line quality control.* Central Japan Quality Control Assoc.
- Wang, X., Wang, Y. & Xu, D. (2012) *'Lean six sigma implementation in equipment maintenance process.*
- Zhao, D., Ye, W. & Gao, C. (2012) *'Research on process optimization for equipment maintenance based on lean six sigma management.*

## Anexos

	Pág.
Anexo 1: Procedimiento de cambio de llantas 1 y 2 – trabajo estándar .....	1
Anexo 2: Procedimiento de cambio de llantas 1 y 2 – trabajo paralelo.....	2
Anexo 3: Procedimiento de cambio de llantas 3-4 y 5-6 – trabajo estándar .....	3
Anexo 4: Procedimiento de cambio de llantas 3-4 y 5-6 – trabajo paralelo .....	4

Anexo 1: Procedimiento de cambio de llantas 1 y 2 – trabajo estándar





<b>Cambio de Llantas posiciones 1 y 2 estándar KOMATSU 930</b>				
Código: GMN-CLLE-LLA-GO002		Versión: 2 (Fecha: 04/02/2024)		
Tipo de documento: Guía Operativa		Páginas: 1 de 1		
Macroproceso: Procesos operativos		Proceso: Cambio de llantas		
<b>Recursos</b>	<b>Confirmación de Procesos</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Seguridad</b>	
Camiones KOM 930	Ejecuta: Mecánicos Frecuencia: Diaria Confirma: Supervisor Área: Mantto Mina	Asegurar el seguro y correcto cambio de llantas.  Riesgos Operacionales RC12: RC18:	PETS:GMIN-CLLE-LLAN-PETS007	
<b>Ejecución.</b>				

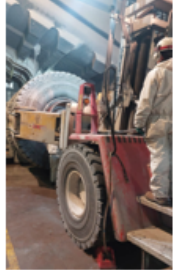
KPI
TIEMPO DE CAMBIO LLANTAS 1Y2
➔
META: 120 min

**CAMBIO DE LLANTAS POSICIONES 1 y 2**  
**Comunicar a Mx traslado del equipo a Truck Shop**  
**Este trabajo se realiza con 3 mecánicos y 1 manipulador.**

- 1 Trabajos de preparación: ( *Tiempo de preparación de llantas a instalar 20 min.*
  - Tener llantas preparadas
  - Posicionar equipos: Superjack y gata 200 tn.
- 2 • Hacer el IPERC (realizar en el área de trabajo):  
 Por traslado, ingreso, lavado previa evaluación,
- 3 Posicionar el equipo, ingresar a bahía frontalmente, apagar equipo, disipar energías residuales y colocar tacos.  
 Agregar en el IPERC los pasos de levante equipo y desinflado de ambas llantas.  
 Proceder a levantar equipo y desinflar llantas delanteras.  
 Completar el IPERC los pasos del proceso de cambio de llantas Pos 1 y 2.
- 4 **Desmontaje de llantas:**  
 Desmontaje de llanta solo se realiza con un solo manipulador cualquiera de las posiciones.
  - Jalar de la llanta con el manipulador usando un vigía, esperar el destalonado de la parte interior.
  - Colocar las llantas salientes a una zona libre del tránsito del manipulador.
- 5 Instalación de llantas y sensores se realiza de manera indistinta en cada posición.
- 6 Inflar llantas con gas nitrógeno y proceder a retirar Super Jack y gatas respectivamente.
- 7 Comunicar al MX el termino de trabajo 30 minutos antes del termino de trabajo y Traslado el equipo a mina en zona de parqueo, usar el código de traslado.

PASOS DE LA TAREA	TIEMPO (min)
Lavado de equipo	25
Traslado a taller	8
Posicionamiento de equipo	7
Levante y Desinflado	18
Retiro de Llantas Pos 1	16
Montaje de Llantas Pos 1	16
Retiro de Llantas Pos 2	16
Montaje de Llantas Pos 2	16
Inflado de Llantas	16
Retiro de Superjack y gatas	5



**Nota de Seguridad:**

- Antes de que el Personal de piso ingrese entre el manipulador y el neumático, el Operador del manipulador debe apagar el equipo y debe salir de la cabina. El vigía deberá colocar el taco en el neumático delantero del manipulador.
- Durante el Inflado de llantas los brazos del manipulador y/o 02 llantas apiladas en forma horizontal deben colocarse al frente del neumático a inflar, de tal manera que sirva de contención en caso de una posible salida intempestiva de componentes.

## Anexo 2: Procedimiento de cambio de llantas 1 y 2 – trabajo paralelo

<b>Cambio de Llantas posiciones 1 y 2 en paralelo KOMATSU 930</b>			
Código: GMIN-CLLE-LLAN-LEAN-G001			Versión: 2 (Fecha: 09/08/2023)
Tipo de documento: Guía Operativa			Páginas: 1 de 1
<b>Macroproceso: Procesos operativos</b>		<b>Proceso: Cambio de llantas</b>	
Recursos	Confirmación de Procesos	Objetivo	Seguridad
Camiones KOM 930	Ejecuta: Mecánicos Frecuencia: Diaria Confirma: Supervisor Área: Mantto Mina	Asegurar el seguro y correcto cambio de llantas. Riesgos Operacionales RC12: RC18:	PETS:GMIN-CLLE-LLAN-PETS007

Ejecución.

KPI
TIEMPO DE CAMBIO LLANTAS 1Y2
→
META: 90 min

**manipuladores**  
 Trabajos de preparación: ( Tiempo de preparación de llantas a instalar 20 min.

- 1
  - Tener llantas preparadas según gráfico.
  - Alas llantas Bridgestone que son de un solo sentido prepararlas marcando con una flecha para evitar de instarlas en forma equivocada
- 2
  - Posicionar equipos: SUPER JACK y gata 200 tn.
- 25 min
  - Hacer el IPERC (realizar en el área de trabajo): Por traslado, ingreso, lavado previa evaluación.
- 3
  - Ejecución del Lavado de las llantas a cambiar.
- 15 min

Posicionar el equipo, ingresar a bahía frontalmente, apagar equipo, disipar energías residuales y colocar tacos.
- 20 min

Agregar en el IPERC los pasos de levante equipo y desinflado de ambas llantas. Proceder a levantar equipo y desinflar llantas delanteras. Completar el IPERC los pasos del proceso de cambio de llantas Pos 1 y 2.
- 4

**Desmontaje de llantas:**  
 Llanta P1 con manipulador 1 y llanta P2 con manipulador 2.

  - Jalar de la llanta con el manipulador usando un vigía, esperar el destalonado de la parte interior.
  - Colocar las llantas salientes a una zona libre de tránsito de manipulador.
- 5

**Montaje de llantas y sensores:**  
 Llanta P1 con manipulador 1 y llanta P2 con manipulador 2.
- 6

**20 min**  
 Inflar llantas con gas nitrógeno. Proceder a retirar SUPER JACK y gatas respectivamente.
- 7

Comunicar al MX el término de trabajo 30 minutos antes del término de trabajo y trasladar el equipo a mina en zona de parqueo, usar el código de traslado.

**Nota de Seguridad:**

- Antes de que el Personal de piso ingrese entre el manipulador y el neumático, el Operador del manipulador debe apagar el equipo y debe salir de la cabina. El vigía deberá colocar el taco en el neumático delantero del manipulador.
- Antes de instalar las llantas colocar pasta vegetal al talón de las llantas.
- Usar los boquitoy para tener una comunicación efectiva.
- Durante el inflado de llantas los brazos del manipulador y/o 02 llantas apiladas en forma horizontal deben colocarse al frente del neumático a inflar, de tal manera que sirva de contención en caso de una posible salida intempestiva de componentes.








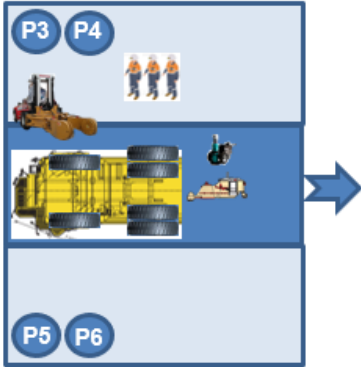
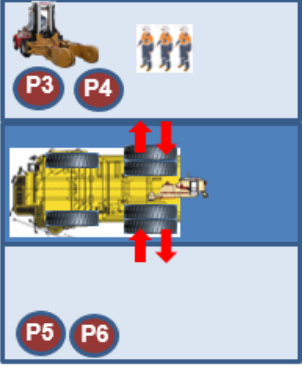










Anexo 3: Procedimiento de cambio de llantas 3-4 y 5-6 – trabajo estándar

<b>Cambio de Llantas posiciones 3, 4, 5 y 6 – Trabajo estándar</b>				
Código: GMN-CLLE-LLA-GO004		Versión: (Fecha: 4/02/2024) V3		
Tipo de documento: Guía Operativa		Páginas: 1 de 1		
Macroproceso: Procesos operativos			Proceso: Cambio de llantas	
Recursos	Confirmación de Procesos	Objetivo	Seguridad	
Camiones KOM 930	Ejecuta: Mecánicos Frecuencia: Diaria Confirma: Supervisor Área: Mantto Mina	Asegurar el seguro y correcto cambio de llantas.  Riesgos Operacionales Atrapamientos	<b>GMN-CLLE-LLAN-PETS007</b>	
<b>Ejecución: 180 minutos</b>				
<b>CAMBIO DE LLANTAS POSICIONES 3/4 y/o 5/6 con 3 mecánicos y un solo Manipulador</b>				
<ol style="list-style-type: none"> <li>1 Antes de que llegue el camión:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tener llantas preparadas según gráfico 1.</li> <li>• Posicionar equipos de acuerdo al gráfico 1.</li> </ul> </li> <li>2 Al llegar el camión al TS:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hacer el IPERC (realizar en el área de trabajo): Por traslado, ingreso y lavado, previa evaluación.</li> </ul> </li> <li>3 LAVADO DE EQUIPO                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar lavado de equipo de acuerdo al GO lavado de camiones KOM 930</li> </ul> </li> <li>4 TRASLADO DE EQUIPO AL TALLER                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trasladar equipo e ingresar a bahía.</li> <li>• Hacer el IPERC por levante de tolva para posicionar botapiedra de ser necesario, levante de equipo y desinflado de las llantas.</li> <li>• Proceder a levantar equipo y desinflar llantas posteriores.</li> <li>• Completar IPERC con los pasos siguientes de la tarea a realizar – proceso de cambio.</li> </ul> </li> <li>5 Desmontar llantas posteriores Llanta P3 y P4 y llanta P5 y P6 con un solo manipulador                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retirar la llanta con el manipulador usando un vigía, esperar el destalonado de la parte interior</li> </ul> </li> <li>6 Instalación de llantas posteriores Llanta P3 y P4 y P5 y P6 con un solo manipulador</li> <li>7 Inflar llantas con gas nitrógeno y proceder a retirar gatas</li> <li>8 Comunicar al MX del termino y trasladar el equipo a mina, usar el código de traslado.</li> </ol>		<div style="text-align: center;"> <p><b>Gráfico 1</b></p>  </div>		
		<div style="text-align: center;"> <p><b>Gráfico 2</b></p>  </div>		
<p><b>Nota de Seguridad:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Antes de que el Personal de piso ingrese entre el manipulador y el neumático, el Operador del manipulador debe apagar el equipo y debe salir de la cabina. El vigía deberá colocar el taco en el neumático delantero del manipulador.</li> <li>- Durante el Inflado de llantas los brazos del manipulador deben colocarse al frente del neumático a inflar, de tal manera que sirva de contención en caso de una posible salida intempestiva de componentes.</li> </ul>				

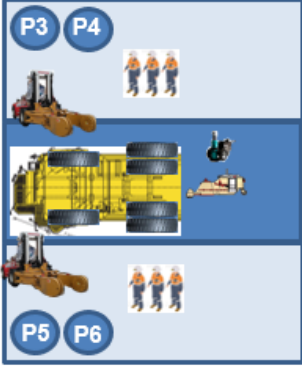
Anexo 4: Procedimiento de cambio de llantas 3-4 y 5-6 – trabajo paralelo

<b>Cambio de Llantas posiciones 3, 4, 5 y 6 PARALELO KOMU 930</b>				
Código: GMN-CLLE-LLA-GO003		Versión: (Fecha: 07/06/2024) V5		
Tipo de documento: Guía Operativa		Páginas: 1 de 1		
Macroproceso: Procesos operativos			Proceso: Cambio de llantas	
Recursos	Confirmación de Procesos	Objetivo	Seguridad	
Camiones KOM 930	Ejecuta: Mecánicos Frecuencia: Diaria Confirma: Supervisor Área: Manto Mina	Asegurar el seguro y correcto cambio de llantas. Riesgos Operacionales Atrapamientos	<b>GMN-CLLE-LLAN-PETS007</b>	

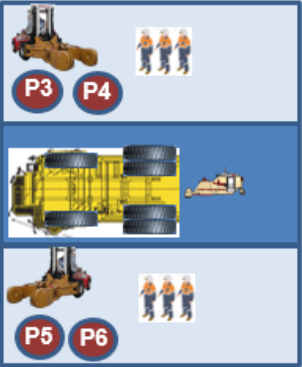
**KPI : REDUCCION TIEMPO DE CAMBIO LLANTAS 3,4,5,6 META 135 min**

### CAMBIO DE LLANTAS POSICIONES 3/4 y/o 5/6 con 6 mecánicos y 2 Manipuladores

- 1
 Antes de que llegue el camión:
  - Tener llantas preparadas según gráfico 1.
  - Posicionar equipos de acuerdo al gráfico 1.
- 2
 Al llegar el camión al TS:
  - Hacer el IPERC (realizar en el área de trabajo): Por traslado, ingreso y lavado, previa evaluación.
- 3
**LAVADO DE EQUIPO**  
 Realizar lavado de equipo de acuerdo al GO lavado de camiones KOM 930
- 4
**TRASLADO DE EQUIPO AL TALLER**  
 Traslado de equipo e ingresar a bahía.
- 5
**LEVANTAR BOTAPIEDRA**
- 6
**INGRESAR EL EQUIPO AL TALLER**
  - Hacer el IPERC, levante de equipo y desinflado de las llantas.
  - Proceder a levantar equipo y desinflar llantas posteriores.
- 7
 Desmontar llantas posteriores Llanta P3 y P4 con manipulador 1 y llanta P5 y P6 con manipulador 2
- 8
 Instalación de llantas posteriores Llanta P3 y P4 con manipulador 1 y P5 y P6 con manipulador 2
- 9
 Inflar llantas con gas nitrógeno y proceder a retirar gatas
- 10
 Comunicar al MX del termino y trasladar el equipo a mina, usar el código de traslado.



**Gráfico 1**



**Gráfico 2**

**Nota de Seguridad:**

- Antes de que el Personal de piso ingrese entre el manipulador y el neumático, el Operador del manipulador debe apagar el equipo y debe salir de la cabina. El vigía deberá colocar el taco en el neumático delantero del manipulador.
- Durante el Inflado de llantas los brazos del manipulador deben colocarse al frente del neumático a inflar, de tal manera que sirva de contención en caso de una posible salida intempestiva de componentes.