UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

"MAXIMIZACIÓN DE CARGA ÚTIL MEDIANTE EL ANÁLISIS DE KPIS DE RENDIMIENTO Y USO DE MÉTODO SIX SIGMA PARA OPTIMIZAR LAS MEJORES PRÁCTICAS OPERATIVAS EN LA MINERÍA SUPERFICIAL"

PRESENTADO POR:

Bach. Angie Xiomy Flores Quegüe

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA - PERÚ

2025

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 069

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : ☐

Trabajo de Suficiencia Profesional : ☒

Otro: ..... : ☐

II. Documento de aprobación para la sustentación:

RESOLUCIÓN DE CONSEJO DE FACULTAD N° 249-2025-CF-FAIN-UNAM

Fecha: 24 DE NOVIEMBRE DEL 2025

III. El Jurado ha dictaminado la (el) TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL, TITULADO: "MAXIMIZACIÓN DE CARGA ÚTIL MEDIANTE EL ANÁLISIS DE KPIS DE RENDIMIENTO Y USO DE MÉTODO SIX SIGMA PARA OPTIMIZAR LAS MEJORES PRÁCTICAS OPERATIVAS EN LA MINERÍA SUPERFICIAL"

Bachiller: ANGIE XIOMY FLORES QUECÜE

Asesor Principal: Dr. CHRIST JESUS BARRIGA PARIA

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial ☒ Virtual ☐

Con nota: DIECISÉIS (16) por lo que; Sí ☒ No ☐

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 11:30 horas, del 24 de NOVIEMBRE del año 2025 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
Dr. VICTOR ADRIAN PONCE ESTRADA
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
Arquímedes León VARGAS LUQUE
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
César Augusto Villa Alagón
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
ANGIE XIOMY FLORES QUECÜE
(Nombres y Apellidos)

CONTENIDO

Pág.

Capítulo I 9
Introducción 9
1.1. Trayectoria del autor 11
1.2. Descripción de la empresa 11
1.3. Organigrama de la empresa 13
1.4. Áreas y funciones desempeñadas 14
1.4.1. Áreas 14
1.4.2. Funciones 14
Capítulo II 15
Descripción de una actividad específica 15
2.1. Control de Índices Operacionales 15
2.2.1. Ciclo de excavación 17
2.2.2. Análisis de eventos críticos 18
2.2.3. Aplicación de Six Sigma 21
2.2.4. Parametros Estadisticos 24
2.2.5. Capacidad de un proceso 25
2.2.6. Regla empirica 68-95-99.7 27
2.2.7. Confiabilidad Operacional 27
Capítulo III 29
Antecedentes y objetivos 29
3.1. Antecedentes 29
3.1.1. Antecedentes nacionales 29
3.1.2. Antecedentes internacionales 38
3.2. Objetivos 43
3.2.1. Objetivo General 43
3.2.2. Objetivos Específicos 44
Capítulo IV. 45
Resultados, indicadores y aportes 45
4.1. Resultados 45

4.2. Indicadores 69
4.3. Aportes 72
Capítulo V. 74
Aspectos complementarios / recomendaciones 74
Capítulo VI 77
Referencias 77
ANEXOS 81

Índice de Figuras

Pág.

Figura 1 *Organigrama de STRACON S.A.* ____ *13*
Figura 2 *Time Usage Model* ____ *16*
Figura 3 *Ciclo de excavación* ____ *18*
Figura 4 *Evento Boom Jack* ____ *19*
Figura 5 *Camión de sobrecarga (Overload)* ____ *20*
Figura 6 *Esquema de política de sobrecarga* ____ *21*
Figura 7 *Modelo Six Sigma* ____ *22*
Figura 8 *Esquema regla empírica* ____ *27*
Figura 9 *Distribución payload muestra del año 2025* ____ *48*
Figura 10 *Distribución payload muestra del año 2024* ____ *49*
Figura 11 *Esquema de % Sobrecargas por mes en el año 2024* ____ *50*
Figura 12 *Esquema de % Sobrecargas por mes en el año 2025* ____ *51*
Figura 13 *Esquema de % Eventos Boom Jack por mes en el año 2024.* ____ *52*
Figura 14 *Esquema Estadístico Grupo 1 – 2025* ____ *53*
Figura 15 *Esquema Estadístico Grupo 1-2024* ____ *55*
Figura 16 *Esquema Estadístico Grupo 2 - 2025* ____ *57*
Figura 17 *Esquema Estadístico Grupo 2- 2024* ____ *59*
Figura 18 *Esquema Estadístico Grupo 3- 2025* ____ *61*
Figura 19 *Esquema Estadístico Grupo 3- 2024* ____ *63*
Figura 20 *Esquema Estadístico Grupo 4- 2025* ____ *65*
Figura 21 *Esquema Estadístico Grupo 4- 2024* ____ *67*

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 1 Trayectoria profesional del autor ____ *11*
Tabla 2 Niveles del six sigma ____ *23*
Tabla 3 Criterios pp y ppk ____ *24*
Tabla 4 Distribución de Datos según Intervalos Estándar (Muestra 2025 - Post-Optimización) ____ *42*
Tabla 5 Comparación de KPIs Antes y Después de la Intervención ____ *43*
Tabla 6 Distribución del payload ____ *50*
Tabla 7 Capacidad del proceso ____ *50*
Tabla 8 Distribución del payload ____ *52*
Tabla 9 Capacidad del proceso ____ *52*
Tabla 10 Distribución del payload ____ *54*
Tabla 11 Capacidad del proceso ____ *54*
Tabla 12 Distribución del payload ____ *56*
Tabla 13 Capacidad del proceso ____ *56*
Tabla 14 Distribución del payload ____ *58*
Tabla 15 Capacidad del proceso ____ *58*
Tabla 16 Distribución del payload ____ *60*
Tabla 17 Capacidad del proceso ____ *60*
Tabla 18 Distribución del payload ____ *62*
Tabla 19 Capacidad del proceso ____ *62*
Tabla 20 Distribución del payload ____ *64*
Tabla 21 Capacidad del proceso ____ *64*

Acrónimos y Abreviaturas

AMT	Transmisión manual automatizada.
BOOM JACK	Evento crítico causado por levantamiento excesivo de la pluma de la pala.
CAT	Caterpillar Inc., fabricante de equipos mineros.
Cp	Capacidad del proceso.
Cpk	Capacidad real del proceso considerando su centrado.
DMAIC	Define-Measure-Analyze-Improve-Control (fases de Six Sigma).
DPMO	Defectos por millón de oportunidades.
GMG	Global Mining Guidelines Group.
HR	Horas (hours).
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
KPI	Key Performance Indicator / Indicador Clave de Desempeño.
OVERLOAD	Sobrecarga del camión minero.
S/.	Nuevo sol peruano.
SMART	Surface Mining Association for Research and Technology.
Six Sigma	Metodología de mejora contínua enfocada en reducir la variabilidad.
STRACON S.A.	Empresa para la cual realizaste la experiencia profesional.
TM	Toneladas métricas.
TUM	Time Usage Model / Modelo de Uso del Tiempo.
UPC	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
Yield	Rendimiento del proceso.

Resumen

En la industria minera, la optimización de operaciones es clave para mejorar la productividad y reducir costos. Este estudio se desarrolló en la mina Quellaveco, una operación a cielo abierto que utiliza palas eléctricas CAT 7495HD, palas hidráulicas CAT 6060BH y camiones autónomos CAT 794AC AMT. El objetivo fue maximizar la carga útil (payload) mediante el análisis de indicadores clave de desempeño (KPIs) y la metodología Six Sigma (DMAIC). Se identificaron brechas operativas relacionadas con la tasa de producción, analizando eventos críticos como sobrecargas (overloads) y eventos Boom Jack, que afectan la eficiencia de los equipos. Aplicando análisis estadístico basado en la regla empírica 68-95-99.7, se logró un aumento del 3.3% en el payload promedio dentro de la primera desviación estándar, reduciendo la variabilidad y mejorando la estabilidad operativa. Las sobrecargas por ciclo disminuyeron un 7.9%, y los eventos Boom Jack se redujeron un 25%. Esto incrementó la tasa de producción en 0.7% para la pala CAT 7495 y 1% para la CAT 6060. Además, el índice Cpk mejoró un 8% en algunos grupos de operadores, reflejando mayor consistencia. Este informe se estructura en cinco capítulos: contexto general, actividades desarrolladas, antecedentes y objetivos, resultados obtenidos, y conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave: Sobrecarga, evento Boom jack, tiempos clave, rendimientos, indicadores, control, optimización, six sigma, carga útil, productividad.

Abstract

Mining companies strive to optimize operations to enhance productivity and reduce costs. This study was conducted at the Quellaveco open-pit mine, employing CAT 7495HD electric shovels, CAT 6060BH hydraulic shovels, and autonomous CAT 794AC AMT trucks. The aim was to maximize payload through the analysis of key performance indicators (KPIs) and the Six Sigma (DMAIC) methodology. Operational gaps related to production rates were identified, focusing on critical events such as overloads and Boom Jack incidents, which impair equipment efficiency. Using statistical analysis based on the 68-95-99.7 empirical rule, a 3.3% increase in average payload was achieved within the first standard deviation, reducing variability and enhancing operational stability. Cycle overloads decreased by 7.9%, and Boom Jack events dropped by 25%. This led to a 0.7% production rate increase for the CAT 7495 shovel and 1% for the CAT 6060. Additionally, an 8% improvement in the Cpk index was observed in certain operator groups, indicating greater performance consistency. The report is structured in five chapters: general context, activities performed, background and objectives, results, and conclusions and recommendations.

Keywords: Overload, boom jack event, key times, performance, indicators, control, optimization, six sigma, payload, productivity.

Capítulo I
Introducción

La industria minera representa uno de los sectores económicos más importantes de Perú, contribuyendo significativamente al desarrollo nacional mediante la generación de empleo, inversión extranjera directa e ingresos por exportaciones. El desempeño y la conducta de los operadores de carguío es fundamental en la eficiencia operativa, la seguridad y la productividad de la operación. La naturaleza de las actividades mineras, caracterizadas por el uso de maquinaria pesada en entornos desafiantes, requiere un alto nivel de competencia técnica y comportamental por parte de los trabajadores. Sin embargo, diversos factores pueden influir en su rendimiento, incluyendo la fatiga, la capacitación insuficiente, la falta de motivación y la cultura organizacional.

Dentro de las actividades mineras, el carguío y acarreo juegan un papel central en la cadena productiva, ya que están directamente relacionados con la movilidad de grandes volúmenes de material. Es aquí donde se presenta la importancia de monitorear y analizar el desempeño operativo mediante indicadores llamados KPIs (ver glosario de términos en Anexo 4), así como también implementar metodologías de mejora continua como Six Sigma, con el fin de identificar oportunidades de mejora, reducir la variabilidad y optimizar el rendimiento de los equipos y operadores.

Este trabajo tiene como propósito presentar una experiencia profesional desarrollada durante mi desempeño en STRACON S.A., empresa dedicada a la ejecución de proyectos mineros en diferentes etapas, desde la construcción hasta la operación de minas. Durante mi participación, estuve involucrada en el análisis de datos operacionales, seguimiento de KPIs y evaluación del desempeño de operadores de carguío, enfocándome especialmente en la detección y corrección de eventos críticos como sobrecargas (overload) y Boom Jack, los cuales impactan negativamente en la productividad y la seguridad. A través del uso de herramientas estadísticas y metodologías como el Modelo de Uso de Tiempo y Six Sigma, se logró identificar áreas de mejora,

implementar acciones correctivas y evaluar su impacto en los resultados operativos.

Las mejores prácticas representan procesos y comportamientos que evitan lesiones a las personas y daños a los equipos, a la vez que maximizan la productividad. Más que sentido común, son “reglas” comprobadas que incorporan el diseño y la ingeniería de las máquinas junto con la experiencia de los operadores, los mecánicos y los electricistas.

El cumplimiento de las mejores prácticas operativas por parte de todos los equipos puede reducir los costos operativos de una mina. Sin embargo, esto requiere un compromiso de todos los niveles de la empresa minera. La capacitación adecuada en las “mejores prácticas operativas” aceptadas y la responsabilidad de cumplirlas son fundamentales. Las máquinas operadas por operadores rudos y abusivos experimentarán muchos más daños en los componentes y tiempos de inactividad que las operadas por operadores buenos y concienzudos. Las palas operadas de manera adecuada, fluida, eficiente y dentro de las especificaciones del fabricante tendrán costos operativos generales más bajos y serán más productivas a largo plazo.

A través de este trabajo, se busca no solo optimizar la productividad en la mina, sino también contribuir a la reducción de incidentes y promover un entorno laboral más seguro y eficiente. La investigación se apoyará en metodologías cualitativas y cuantitativas para evaluar el impacto de las estrategias implementadas y generar recomendaciones que puedan ser replicadas en otras operaciones mineras.

1.1. Trayectoria del autor

A continuación, se presenta un resumen breve de la trayectoria profesional del autor, destacando su experiencia en diversas empresas y roles relacionados con el sector minero y de análisis de datos. La tabla 1 detalla los cargos ocupados, las empresas donde se desempeñó, los periodos trabajados y la duración de cada experiencia.

Tabla 1

Trayectoria profesional del autor

Cargo	Empresa	Periodo	Duración
Analista de Inteligencia de datos	Ferreyros	06/11/2024 - Actualidad	11 meses
Asistente de Operaciones	Stracon	13/06/2024 - 31/10/2024	6 meses
Analista de datos	Citric Analysis and Solution SPA	01/01/2024 - 22/05/2024	5 meses
Traineer Operaciones	Anglo American	03/01/2023 - 22/12/2023	1 año
Auxiliar de Operaciones	Trabajos Marítimos	01/05/2022 - 27/12/2022	8 meses

Nota: Elaboración propia.

Desde el inicio de mi formación profesional, he tenido la oportunidad de trabajar en diversas empresas del sector minero y tecnológico, permitiéndome adquirir conocimientos en gestión operativa, análisis de datos y mejora de procesos. Mi interés por la minería se complementa con habilidades en inteligencia de datos, lo que me ha ayudado a comprender y optimizar procesos mineros desde una perspectiva cuantitativa y estratégica.

1.2. Descripción de la empresa

Actividad

STRACON S.A. es una empresa líder en la prestación de servicios integrales en minería y construcción en Latinoamérica. Su misión es brindar soluciones seguras, eficientes e innovadoras, agregando valor a sus clientes

y grupos de interés. Cuenta con una amplia trayectoria en el desarrollo de proyectos mineros, desde la planificación y construcción hasta la operación y cierre de minas. Los servicios que brinda cubren todas las etapas de un proyecto minero, desde la planificación, desarrollo, construcción, operación, hasta el cierre de la mina.

La empresa ofrece una gama completa de servicios, entre los cuales se encuentran:

Servicios de construcción.

La actividad de STRACON S.A. en este rubro abarca el movimiento de tierras y trabajos civiles para la construcción de infraestructura de mina, destacando:

- Presa de relaves, diques, pozas, reservorios, etc.
- Preparación y limpieza de la zona (servicios de movimiento de tierras).
- Construcción de caminos de acceso y acarreo.
- Construcción de campamentos, grifos y polvorines.
- Desarrollo de ingeniería y gestión de proyectos.

Operaciones mineras

Los servicios de STRACON S.A. cubren la operación de mina y la construcción en lugares remotos, extrayendo metales preciosos y básicos; incluye:

- Construcción, explotación y cierre de minas en lugares remotos.
- Diseño de plan de minado para maximizar el retorno de la inversión y cumplir con los requisitos de los clientes.
- Perforación y voladura.
- Carguío y acarreo.
- Operación y mantenimiento de flotas.

Visión y misión de la empresa

Visión: Ser el proveedor líder a nivel mundial de servicios de minería y construcción.

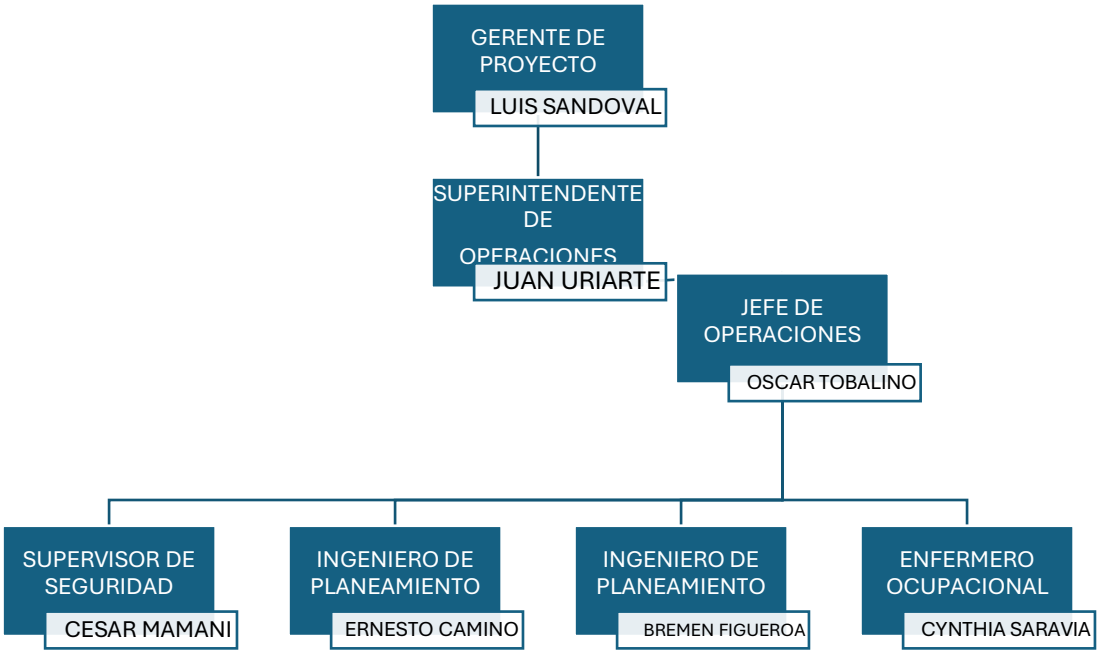
Misión: Construir un mundo mejor brindando servicios seguros, eficientes e innovadores, ofreciendo carreras retadoras y agregando valor a nuestros grupos de interés

1.3. Organigrama de la empresa

El organigrama de STRACON S.A., presentado a continuación, refleja una estructura jerárquica y funcional de la empresa, orientada hacia la eficiente ejecución de proyectos mineros y destacando las relaciones entre los diferentes roles clave que participan en el desarrollo y ejecución de proyectos mineros. En la Figura 1 se puede visualizar claramente la distribución de responsabilidades y autoridad dentro del equipo de trabajo.

Figura 1

Organigrama de STRACON S.A.



Nota: Elaboración propia.

1.4. Áreas y funciones desempeñadas

En STRACON S.A., trabajé en las áreas de Operaciones Mina y Gestión Mina, con funciones enfocadas en la mejora de procesos de carguío y acarreo:

- Monitoreo de KPIs como payload promedio y tiempo de ciclo usando software estadístico.
- Análisis de eventos críticos (sobrecargas, Boom Jack) mediante metodología Six Sigma.
- Elaboración de reportes mensuales de tonelaje y planes de acción para reducir tiempos improductivos.
- Coordinación con equipos operativos para implementar capacitaciones basadas en hallazgos de datos.

1.4.1. Áreas

- Operaciones mina: encargada de la ejecución de actividades de excavación, carguío y acarreo.
- Gestión Mina: responsable del seguimiento de metas operativas, reporte de avances y análisis de indicadores clave de desempeño.

1.4.2. Funciones

Las principales funciones que desempeñé fueron las siguientes:

- Seguimiento de actividades operacionales programadas y programar actividades no identificadas en el programa semanal.
- Elaboración de reporte de movimiento de tonelaje de fin de mes.
- Identificación de necesidades adicionales para mejorar el rendimiento de equipos de carguío.
- Participar de reuniones con el equipo de operaciones para la evaluación de indicadores de performance de equipos (KPI´s) y de gestión de proyectos.
- Revisión y ejecución de planes de trabajo a corto plazo.
  Elaboración de plan view de presupuesto capex
  de acuerdo con las necesidades operativas.

Capítulo II
Descripción de una actividad específica

Durante mi desempeño en STRACON S.A., participé activamente en el análisis y seguimiento de KPIs operacionales, enfocado principalmente en la evaluación del rendimiento de operadores de carguío en la mina Quellaveco, utilizando palas CAT 7495HD y CAT 6060BH, así como camiones autónomos CAT 794AC AMT.

2.1. Control de Índices Operacionales

Dentro de esta labor se tiene la medición de tiempo mediante el Modelo de Uso de Tiempo (TUM). De acuerdo con John T. (2016), el TUM es un marco de clasificación de actividades operacionales en categorías de tiempo. Los TUM's han sido usados desde hace más de 40 años (Ballantyne, 2019) y el modelo más utilizado actualmente se basó inicialmente en el modelo de KPI y definiciones de tiempo de la Asociación de Investigación y Tecnología de Minería Superficial (SMART, por sus siglas en inglés), alrededor de 1999, el cual a su vez se fundamentaba en el modelo de Pfleider citado en su libro "Surface Mining" de 1968. GMG (Global Mining Guidelines Group) comenzó las consultas con la industria utilizando el modelo SMART y estas definiciones de KPI como punto de partida.

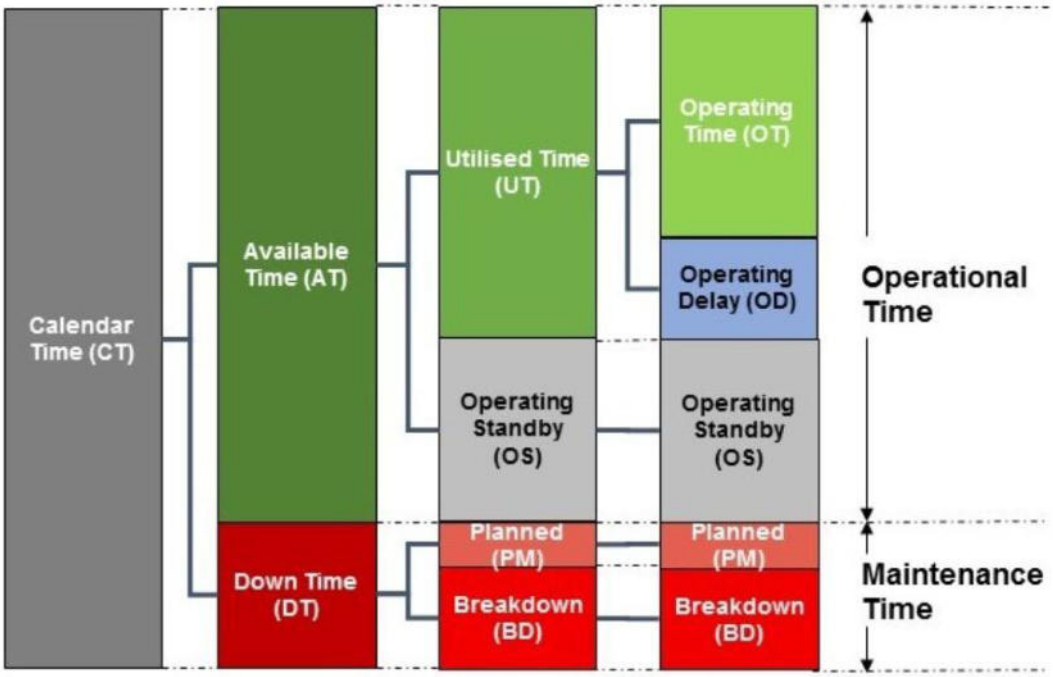
Este modelo de uso del tiempo se basa en la premisa de que la operación debe contabilizar todo el tiempo. Al identificar y eliminar tiempo no productivo, las operaciones pueden hacer el mejor uso de sus activos y mejorar así la eficiencia y la eficacia de los equipos, lo que se traduce en una mejora inmediata del rendimiento.

Las categorías de tiempo reflejadas en el modelo nos hacen comprender cómo se está utilizando el tiempo, lo que permite el análisis, el apoyo a la toma de decisiones y el desarrollo de las medidas pertinentes. Estas categorías también proporcionan la base para calcular los KPI comunes que se identifican en la Figura 2.

Al identificar y eliminar el tiempo no productivo, las operaciones pueden mejor uso de sus activos y mejorar así la eficiencia y la eficacia de los equipos.

Figura 2

Time Usage Model



Nota: John T. (2016)

El tiempo para los equipos asociados al proceso de minera está distribuido de la siguiente manera:

A. Tiempo calendario: Total, de horas posibles en un periodo (24 horas por día y 365 días por año).

B. Tiempo disponible: Son las horas en las que el equipo está disponible para producción.

C. Tiempo no disponible: Son las horas en las que el equipo no está disponible para producción.

D. Tiempo operativo: Son las horas en las que un equipo está desarrollando producción primaria o secundaria.

E. Tiempo perdido: Son las horas en las que un equipo está disponible pero no se encuentra desarrollando producción alguna.

F. Tiempo utilizado. Son las horas en las que el equipo se utiliza, incluyendo tiempos improductivos o pérdidas de producción.

G. Tiempo no utilizado. Son las horas en las que el equipo está disponible para ser utilizado, pero no se utiliza.

H. Tiempo no disponible. Son las horas en las que el equipo no está disponible para uso por cuestiones atribuibles a mantenimiento o reparaciones del equipo (Ballantyne R., 2019).

2.2.1. Ciclo de excavación

El ciclo de excavación es una secuencia repetitiva de movimientos que realiza una pala ya sea eléctrica o hidráulica para cargar material que puede ser mineral o estéril a un camión minero. Este ciclo es fundamental para medir el rendimiento operativo de los equipos de carguío, porque permite identificar oportunidades de mejora en tiempos de operación, eficiencia del operador y consistencia en la carga útil.

Estos 4 pasos de un ciclo de excavación determinan el tiempo que demora dicha actividad. Al asignar un rango de tiempo razonable, tenemos la capacidad de medir el desempeño del operador en relación con él. También tenemos la capacidad de determinar exactamente qué está causando las diferencias entre el parámetro real y el estándar.

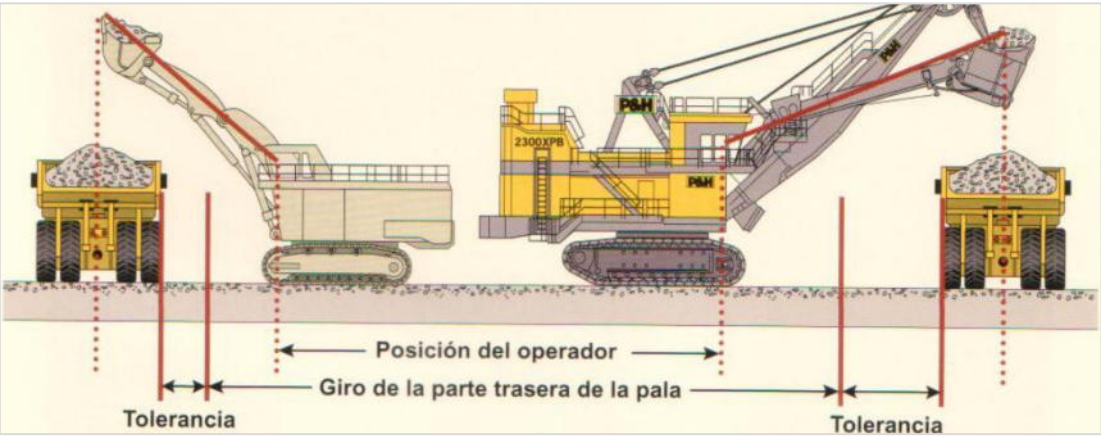
Según Caterpillar (2019), el ciclo de excavación consta de cuatro fases principales:

1. Penetración, que es cuando el cucharón entra en contacto con el banco de material y comienza a llenarse. Es crucial que el operador penetre de manera uniforme para evitar daños al equipo y optimizar el llenado. Una mala penetración puede generar tiempos muertos o sobrecarga no intencional.
2. Levantamiento, una vez que el cucharón está lleno, se levanta hacia la posición adecuada para volcar el material ala camión. Se debe mantener una trayectoria estable para evitar riesgos como el evento Boom Jack. Los movimientos bruscos pueden activar sensores de seguridad, generando interrupciones operativas.

3. Volcado, el cucharón se voltea sobre el camión para descargar el material. Debe realizarse de forma controlada para evitar derrames o daños al camión. Los derrames reducen la carga útil efectiva y afectan la productividad.
4. Regreso, se da cuando la pala regresa a la posición inicial para comenzar un nuevo ciclo. Un movimiento ineficiente aquí aumenta el tiempo total del ciclo esto afecta directamente el payload promedio por hora y el tiempo de ciclo promedio. La Figura 3 muestra a detalle el Ciclo de Excavación.

Figura 3

Ciclo de excavación



Nota: Caterpillar (2019).

2.2.2. Análisis de eventos críticos

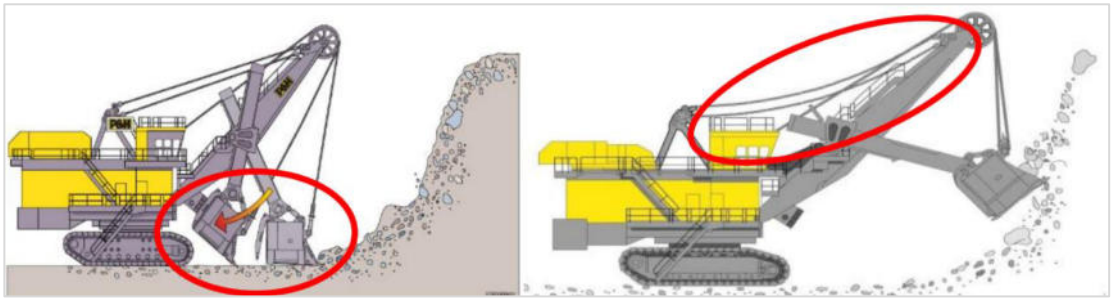
Dos eventos críticos fueron objeto de análisis específico:

- **Boom Jack**: Ocurre cuando la pluma (boom) de la pala o cargador frontal queda bloqueada debido a una mala maniobra o a una falla mecánica, lo que interrumpe el ciclo de carga. En otras palabras, cuando el operador aplica demasiada fuerza de empuje al hacer contacto con el suelo con el cucharón. Esta fuerza de la pluma hacia arriba es lo que hace que los cordones de suspensión de la pluma se aflojen. Si el levantamiento de la pluma es severo, esta entrará en contacto con el interruptor del levantamiento de la pluma y los controles del joystick dejarán de responder.

La Figura 4 muestra el Evento Boom Jack, siendo este un fenómeno crítico que ocurre durante las operaciones mineras y de construcción, especialmente cuando se utilizan palas eléctricas. Este evento es importante porque puede afectar significativamente la eficiencia operativa y la seguridad del equipo.

Figura 4

Evento Boom Jack



Nota: Caterpillar (2019).

- **Sobrecarga**: Se da cuando la carga excede la capacidad recomendada del equipo, lo que puede ocasionar daños en la estructura del camión de transporte y aumentar el consumo de combustible. Los camiones están diseñados para cargarse y funcionar a una capacidad nominal. Nunca se debe sobrecargar un camión. Se debe utilizar la cantidad correcta de pasadas de la cuchara con el factor de llenado adecuado. Los camiones sobrecargados pueden generar condiciones inseguras, como derrames de rocas en las carreteras, mayor mantenimiento de las carreteras y amontonamiento de camiones. También dañan gravemente las suspensiones, los bastidores, los alojamientos de las ruedas, los neumáticos de los camiones y funcionan más lento.

  La Figura 5 muestra un camión minero con sobrecarga, un fenómeno que ocurre cuando la carga excede la capacidad recomendada del equipo.

Figura 5

Camión de sobrecarga (Overload)



Nota: Caterpillar (2019).

Carga de camiones según la política de gestión de carga útil 10/10/20 de Caterpillar

El cumplimiento de la Política de gestión de carga de Caterpillar es beneficioso para la salud y el bienestar de la pala, así como de los camiones de transporte asociados.

Este cumplimiento conducirá a resultados positivos en:

- Confiabilidad extendida
- Disponibilidad mejorada
- Mayor productividad
- Cumplimiento de los requisitos de garantía
- Costos operativos reducidos

La política establece:

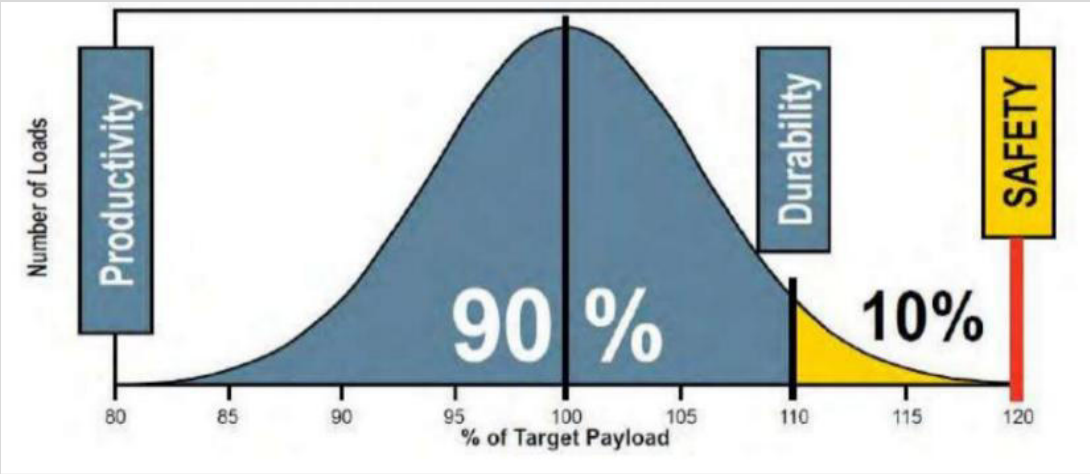
- Que el 90% de las cargas deben caer por debajo del 110% de la carga útil objetivo, y que no más del 50% de las cargas superando el 100% de la carga útil objetivo.

- No más del 10% de las cargas deben exceder el 110% de la carga útil objetivo.
- Ninguna carga debe superar el 120 % de la carga útil objetivo.

La Figura 6 muestra el esquema de política de sobrecarga, un marco establecido por Caterpillar para gestionar y controlar las cargas útiles en equipos mineros.

Figura 6

Esquema de política de sobrecarga



Nota: Caterpillar (2019).

2.2.3. Aplicación de Six Sigma

Sigma (σ) es una unidad estadística de medición que representa la desviación estándar de una población y se utiliza para cuantificar la variabilidad o dispersión de un conjunto de datos. Según LeanSolutions (s.f.), Six Sigma es una metodología de mejora de procesos enfocada en reducir la variabilidad y eliminar defectos o fallos en la entrega de productos o servicios. Esta metodología emplea métodos estadísticos para evaluar el rendimiento de los procesos y relacionarlo con los defectos por millón de oportunidades (DPMO) , definiendo como defecto cualquier evento en el que un producto o servicio no cumple con los requisitos establecidos.

La Figura 9 ilustra el Modelo Six Sigma , una metodología estructurada

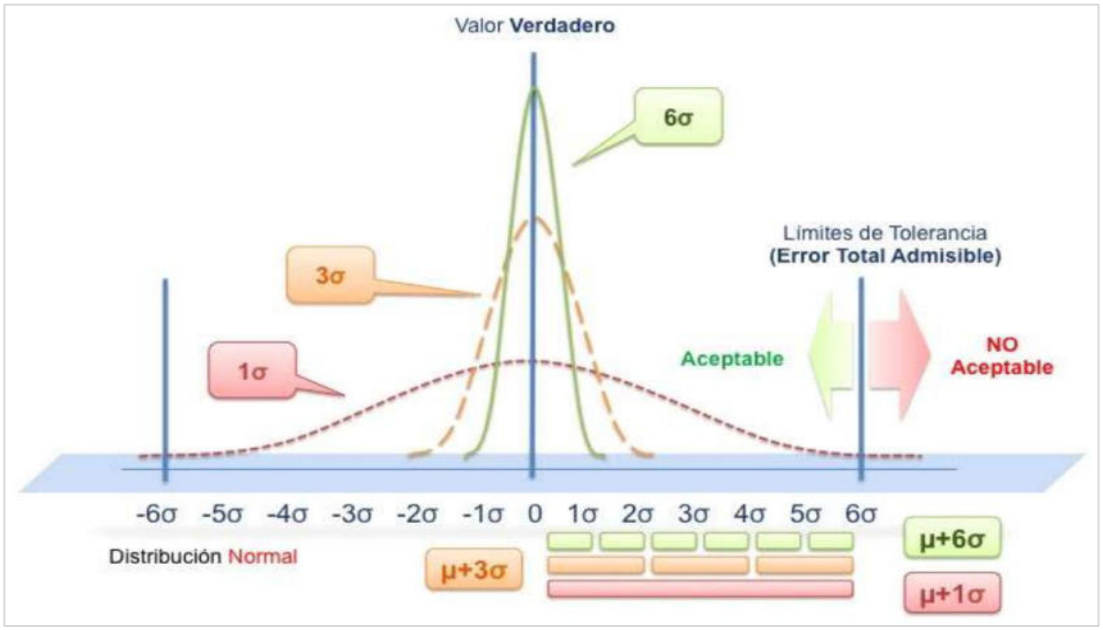
y basada en datos diseñada para optimizar procesos, minimizar la variabilidad y eliminar defectos en diversas operaciones industriales o comerciales. Este modelo se aplica ampliamente en entornos donde la calidad y la eficiencia son críticas, como en la minería, fabricación y otros sectores productivos.

El nivel sigma corresponde a cuantas desviaciones estándar caben entre los límites de especificación del proceso. La mayoría de las empresas tradicionales se encuentran en un nivel 3 sigma, esto quiere decir que tiene un 6.7% de defectos; evidentemente la meta es pasar a un nivel 6 Sigma con 3.4 defectos por millón de oportunidades.

La Tabla 2 muestra los Niveles del Six Sigma, una representación visual que describe cómo la calidad de un proceso mejora a medida que se reduce la variabilidad y se minimizan los defectos.

Figura 7

Modelo Six Sigma



Nota: Elaborado por LeanSolutions. (s.f.).

Tabla 2

Niveles del six sigma

Nivel σ	DMPO	% Defectos	% Rendimiento
0	933.193	93	7
1	690	69	31
2	308.537	31	69
3	66.807	7	93
4	6.21	0.14	99.86
5	233	0.02	99.9997
6	3.4	0.0003	99.9997
7	0.02	0.000002	100

Nota: Elaborado por LeanSolutions. (s.f.)

La metodología Six Sigma (DMAIC) indica que se debe estructurar el siguiente análisis:

- Definir: Establecer como objetivo principal aumentar la tasa de producción mediante el mejoramiento del desempeño de los operadores de carguío.
- Medir: Recolectar datos de payload, tiempos de ciclo, eventos Boom Jack y sobrecargas.
- Analizar: Usar la regla empírica 68-95-99.7 para analizar la distribución del payload y detectar desviaciones significativas.
- Mejorar: Realizar capacitaciones, ajustes operativos y monitoreo continuo mediante desbordas.
- Controlar: Implementar indicadores de control para asegurar la sostenibilidad de los resultados.

2.2.4. Parametros Estadisticos

Los parámetros estadísticos de tendencia central (se utiliza simplemente el término estadísticos cuando se refieren a un conjunto de muestras y no a la población) muestran donde está el mayor agrupamiento de la serie de datos; los más utilizados son la media y la mediana. Los de dispersión señalan cuan amplia es la distribución respecto al estadístico de tendencia central; los más usados son la varianza y el desvío estándar. Los estadísticos de forma dan idea de la simetría y curtosis de la distribución y para ello se utilizan los coeficientes de asimetría y de variación. Las ecuaciones de estos estadísticos son:

- **Medidas de tendencia central**

$$\text{Media} = \left(\frac{1}{n}\right)\sum_{i=l}^{n} X_i \quad (4)$$

$$\text{Mediana} = X_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \quad (5)$$

- **Medidas de dispersión**

$$\text{Varianza} = \left(\frac{1}{n}\right)\sum_{i=l}^{n}(X_i - m^2) \quad (6)$$

$$\text{Desviación estándar} = \sqrt{S^2} \quad (7)$$

$$\text{Rango intercuartil} = Q_3 - Q_1 \quad (8)$$

- **Medidas de forma**

$$\text{Coeficiente de asimetría} = \frac{\left(\frac{1}{n}\right)\sum_{i=l}^{n}(X_i - m)^3}{S^2} \quad (9)$$

$$\text{Coeficiente de Variación} = \frac{S}{m} \quad (10)$$

Los estadísticos de mayor importancia en la exploración minera son la media y la varianza (o desvío estándar) que en la teoría estadística corresponden a los dos primeros momentos de una distribución (el tercer momento es el coeficiente de asimetría).

2.2.5. Capacidad de un proceso

Cada proceso en calidad debe cumplir con especificaciones definidas, estos mismos procesos poseen variables de salida, las cuales a su vez deben estar dentro de las especificaciones para así poder considerar que el proceso está funcionando de manera adecuada. De acuerdo a Pascal O., et al. (2010) para evaluar la capacidad o la habilidad de un proceso radica en evaluar la amplitud de la variación natural del mismo para alguna especificación o característica de calidad dada a evaluar, lo cual dejara saber en qué medida dicha característica critica es satisfactoria o está cumpliendo con las especificaciones.

Índice Cp

Este es conocido como el índice de capacidad potencial del proceso, y se puede definir matemáticamente de la forma que lo muestra la siguiente formula:

$$Cp = \frac{ES - EI}{6\sigma} \quad (11)$$

Donde: ES representa la especificación superior, EI indica la especificación inferior y σ (sigma) representa la desviación estándar. El índice Cp compara el ancho de las especificaciones o bien la variación tolerada para el proceso con la amplitud de la variación real del mismo:

$$Cp = \frac{Variación\ tolerada}{Variación\ real} \quad (12)$$

Índice Cpk

En comparación el índice Cp estima la capacidad potencial del proceso para poder cumplir con las tolerancias, sin embargo una desventaja es que no toma en cuenta el centrado del proceso, esto es que no valora si el proceso está en la media de las dimensiones solo si estas no se han salido de los limites, por lo tanto el Cp se puede modificar para determinar también donde

se localiza la media del proceso respecto a las especificaciones. A este índice Cp modificado se le llama Índice de Capacidad Real o Cpk.

El índice de Cpk será idéntico al Cp cuando la media del proceso se ubique en el punto medio de las especificaciones. Cuando el comportamiento del procesos no está centrado entonces el valor del Índice Cpk será menor que el Cp.

$$Cpki = \frac{(Tx - \bar{x})}{3\sigma} \quad (13)$$

$$Cpks = \frac{(\bar{x} - Ti)}{3\sigma} \quad (14)$$

PP y Ppk criterios

Los Valores de Pp y Ppk deseables por las industrias pueden variar. (Mayoría de industrias /compañías requieren al menos un Pp y Ppk > 1.33).

Algunas metas generales podemos observarlas en la Tabla 3:

Tabla 3

Criterios Pp y Ppk

Criterio	Fórmula	Objetivos Normales	Objetivos Six Sigma
Pp (or Cp)	$\frac{(USL - LSL}{6(Desv.Est)}$	Pp > 1.67	Ppk > 1.5
Ppk (or Cpk)	$Min(\frac{(USL - \bar{x})}{3(Desv.Est)}, \frac{(\bar{x} - LSL)}{3(Desv.Est)})$	Ppk > 1.33	Pp > 2.1

Fuente: Kaizen Institute (2023).

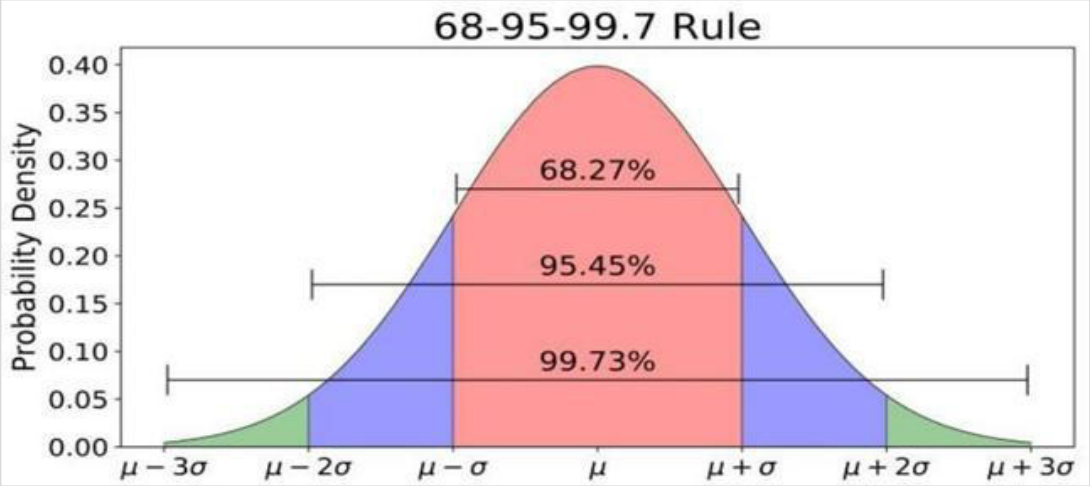
2.2.6. Regla empirica 68-95-99.7

La distribución normal se asocia comúnmente con la regla 68-95-99.7, o regla empírica, que se puede ver en la imagen a continuación. El 68% de los datos se encuentra dentro de una desviación estándar (σ) de la media (μ), el 95% de los datos se encuentra dentro de dos desviaciones estándar (σ) de la media (μ) y el 99.7% de los datos se encuentra dentro de tres desviaciones estándar (σ) de la media (μ).

La Figura 10 muestra el Esquema de la Regla Empírica, una herramienta estadística fundamental para comprender la distribución normal de un conjunto de datos.

Figura 8

Esquema regla empírica



Nota: Elaboración propia.

2.2.7. Confiabilidad Operacional

La confiabilidad de un sistema o un equipo, es la probabilidad de que dicha entidad pueda operar durante un determinado periodo de tiempo sin pérdida de su función. Por otro lado, en el caso de confiabilidad humana es conjunto de conocimientos y técnicas que se aplican en la predicción, análisis y reducción del error humano, la terminología asociada con el concepto de

confiabilidad como una responsabilidad compartida y es fundamental para la operación sostenible de la flota.

Como se mencionó, la forma en que se opera la flota dentro de los equipos de mina puede tener una influencia significativa en su confiabilidad.

Proporcionar seguimiento de capacitación por competencias y coaching a los operadores cuando sea necesario para ayudarles a minimizar la ocurrencia de estos eventos. Se pretende llevar un proceso para atrapar a los operadores o sustituirlos como un proceso disciplinario por daños al equipo, aunque el daño deliberado/intencional requerirá conversaciones disciplinarias con respecto a la responsabilidad. En Angloamerican se tiene el P101 que determina las métricas con el que se evalúa al operador y mide si está rindiendo de manera eficiente, como se observa en el Anexo 1 y 2.

Capítulo III
Antecedentes y objetivos

3.1. Antecedentes

La minería es una industria altamente dependiente de la eficiencia operativa, donde pequeñas mejoras pueden traducirse en grandes beneficios económicos y de seguridad. Varios estudios han demostrado la viabilidad y efectividad de utilizar metodologías como Six Sigma para mejorar procesos en entornos mineros.

3.1.1. Antecedentes nacionales

Rojas et. al. (2019) llevaron a cabo un estudio en el se centró en disminuir los tiempos inactivos en las operaciones mineras subterráneas. Para lograr esto, se utilizó un modelo de Six Sigma, con la meta de hacer más eficiente el proceso de acarreo en las actividades de explotación cut and fill. El estudio se llevó a cabo en una mina subterránea en Perú. Se usó el método DMAIC para encontrar las razones por las que había tiempos sin producción y se sugirieron soluciones prácticas basadas en análisis de datos y herramientas de mejora continua. Se revisaron aspectos como la disponibilidad de equipos, la coordinación entre turnos y los estándares de operación. Esto permitió hacer mejoras organizadas que optimizan el uso de los recursos y reducen las interrupciones inesperadas. Los resultados mostraron que los tiempos de inactividad disminuyeron mucho, lo que indica que hubo una mejora en la estabilidad y en el rendimiento del proceso de acarreo. Este estudio comprobó que se puede usar el método Six Sigma en minas que son difíciles de manejar.

Uribe (2019) realizó un estudio enfocado en la aplicación de la metodología Six Sigma para reducir no conformidades (NOC) en el Proyecto de Mejora Tecnológica (PMT) de la mina Cuajone, licitado por Southern Perú Copper Corporation y ejecutado por la empresa Skex. El objetivo principal fue analizar los errores generados durante la implementación del proyecto y proponer mejoras en calidad y productividad a través de la reducción sistemática de NOC. Se utilizó la métrica Six Sigma para medir el desempeño de los procesos y comparar su evolución entre dos periodos del proyecto. Los

resultados mostraron diferencias significativas entre los periodos analizados, evidenciando una mejora en la métrica SS durante el segundo periodo, lo cual fue validado mediante análisis estadístico con un nivel de confianza razonable. Aunque se encontró una baja correlación entre el número de NOC y el costo de la no calidad (COC), se resaltó la importancia de monitorear y controlar las no conformidades desde una perspectiva económica. Además, se identificó una alta variabilidad en los costos asociados a la no calidad, lo que reflejó la necesidad de implementar procedimientos estandarizados de mejora y control. Este estudio respalda la utilidad de la metodología Six Sigma en entornos mineros complejos, reforzando su aplicabilidad tanto en procesos productivos como en proyectos de ingeniería y construcción, como es el caso de tu experiencia profesional.

Anchiraico y Rojas (2020) realizaron un estudio para mejorar el sistema de acarreo y transporte en la preparación de áreas de profundización en la Unidad Minera Inmaculada, aplicando la metodología Six Sigma. La investigación se diseñó para explicar y se apoyó en el modelo DMAIC, que significa Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Se aplicó a un grupo de trabajo que incluía tres scooptram R1600H de 6 yd^3 y cinco camiones Volvo de 27 toneladas, utilizados en minería subterránea. Se utilizó un método para encontrar los momentos en que no se trabaja de manera eficiente y para hacer que los procesos de acarreo sean más consistentes. Esto se logró a través de análisis de datos y herramientas para mejorar continuamente. Los resultados mostraron que los tiempos en los que no se trabaja disminuyeron mucho. Esto ayudó a que la operación fuera más eficiente y a que los costos bajaran, aunque no se dieron números exactos de cuánto mejoró. La idea principal fue que usar Six Sigma ayudó a usar mejor los equipos, lo que aumentó la productividad y redujo el desgaste prematuro de las piezas. Esto muestra que es útil en las minas subterráneas.

Salgado y otros autores. En 2021, se llevó a cabo un estudio llamado *Mejora de la gestión de la productividad de la flota de carguío y acarreo U*. M Cuajone utiliza la metodología Six Sigma para reducir los retrasos operativos

al cambiar de personal. La investigación buscó reducir el tiempo perdido durante el cambio de personal que maneja los equipos de carga y transporte en la mina, aplicando la metodología Six Sigma. El método utilizado consistió en recolectar y analizar información, tanto en la oficina como en el lugar de estudio. Al principio, se reunieron datos del sistema de gestión de flota JMineOps y luego se verificó esa información en el campo para encontrar las demoras más importantes durante el cambio de turno. En la etapa final, se revisaron los tiempos entre las actividades y el peso de inicio en las diferentes guardias. Se destacó que las principales razones de las demoras fueron: esperar en el área de transporte (37%), personal que llegó tarde (59%), charlas de seguridad (77%) y revisar las pantallas para asignar equipos (84%). Los resultados indicaron una gran disminución en los retrasos durante la primera hora de cada turno. Esto permitió calcular un ahorro de alrededor de 1,062 toneladas de mineral y 3,938 toneladas de desmonte por cada guardia. La producción de mineral aumentó en 2,000 toneladas diarias, lo que generó ganancias diarias de 14,348 y anuales de 5,236,985. Se mejoró y se automatizó el inicio de las operaciones, lo que aumentó la cantidad de palas y volquetes disponibles en 2. El 5% se refiere al uso de palas en 1. El 6% y el uso de camiones de carga en 1. Cuatro por ciento. Este dato es importante para este estudio porque ambos trabajos intentan hacer más eficiente el funcionamiento al reducir el tiempo perdido y usar métodos organizados como Six Sigma.

Peña y Valle (2021) llevaron a cabo un estudio llamado *Análisis de las variables de rendimiento operacional en camiones de bajo perfil para reducir los costos de acarreo en la Unidad Minera Uchucchacua*. El propósito de la investigación fue estudiar diferentes factores de operación, como la cantidad de mineral y material de desecho transportado, el número de viajes, la disponibilidad de maquinaria, el tiempo perdido en las operaciones y el análisis económico, para así lograr disminuir los costos de transporte. El estudio se llevó a cabo en dos fases: de junio a agosto y de septiembre a noviembre. Se utilizó un método que analiza y describe la información. En el primer período,

se movieron 152,685 toneladas. En el segundo período, hubo un aumento importante de 72,817 toneladas, logrando un total de 225,502 toneladas. Este aumento ayudó a mejorar el rendimiento del tonelaje por kilómetro transportado a 260. Setenta y dos toneladas por kilómetro a trescientos noventa. Se lograron 73 toneladas por kilómetro, lo que significó una mejora de 132. Uno por tonelada por kilómetro. También se notó una disminución en los costos de transporte de 10. Siete en el primer período es igual a siete. Uno por segundo, reduciendo los costos en 3. Seis S/t. La disponibilidad mecánica subió del 62% al 64%, lo que ayudó a que se usaran más los equipos de acarreo y a que aumentara la cantidad de tonelaje transportado. Este estudio dice que mejorar las variables de operación y aumentar la disponibilidad de los equipos son aspectos importantes para bajar costos y hacer más eficientes las operaciones mineras.

Huiza y Cuellar (2021), en su trabajo titulado *Análisis de las variables de rendimiento operacional en equipos de acarreo para la optimización de costos en el transporte de lodos desde la planta Kismill al botadero Tucto en la empresa Ecosermy - Morococha*, realizaron un estudio que describe y explica un tema específico. Su objetivo principal fue examinar las variables operativas que afectan el transporte de lodos, para encontrar maneras de reducir los costos. Para esto, analizaron datos como la cantidad de carga transportada, el número de viajes realizados, la capacidad de los camiones, la densidad y los costos por unidad. Usaron una muestra de 15 camiones Volvo FH6X4T que tienen una capacidad de 24 toneladas y que operan en un recorrido de 27. La distancia entre la planta Kingsmill y el botadero Tucto es de 91 kilómetros, y esto ocurrió entre abril y junio de 2021. Los resultados indicaron que se registraron un promedio de 13 encapsulados por día y 27 en total. Se transportan 33 toneladas en cada viaje, logrando un rendimiento de 60. Se registró un costo de transporte de 09 t/km; sin embargo, se notó un aumento en el costo por unidad de 6. Nueve de cada diez. Aumentó a 7 $ por tonelada porque hay más unidades, pero no se mejoró la eficiencia. Los autores llegaron a la conclusión de que, aunque tener más vehículos ayudó a

transportar más carga, era importante aumentar la capacidad de las unidades (más de 25 toneladas) para realmente mejorar el rendimiento y bajar los costos.

Agüero y Ramírez (2022) realizaron un estudio para disminuir el tiempo perdido en las fases de acarreo y transporte en la mina Canta, utilizando la metodología Lean Six Sigma como una forma de mejorar constantemente. El estudio se enfocó en encontrar formas de mejorar desde el comienzo de la carga hasta justo antes de enviar el material a la planta. Para esto, se usaron indicadores como el nivel sigma y la capacidad del proceso, así como el análisis del rendimiento operativo. Mediante el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), se pudo identificar cuáles tiempos aportaban valor y cuáles no. Esto ayudó a sugerir y poner en práctica mejoras que se pueden medir y que aumentaron la eficiencia del sistema. Los resultados indicaron una mejora clara en el nivel sigma del proceso de acarreo, aumentando de 0. Setenta y siete a tres. Hubo un aumento del 44%, además de un crecimiento del 4% en el rendimiento operativo promedio. En el transporte, se observó un incremento en el nivel sigma de 1. Treinta y uno a tres. Se notó un aumento en la cantidad promedio de mineral que se movió, pasando de 361 toneladas métricas a 385 toneladas métricas cada dos semanas. Además, se logró reducir en un 7% el tiempo perdido en todo el proceso. Estas mejoras ayudaron a aumentar la productividad y también hicieron que la operación fuera más sostenible y rentable. Esto demuestra que Lean Six Sigma es una buena forma de resolver problemas difíciles en la minería.

Cárdenas (2022), en su tesis titulada *Optimización de la productividad de los equipos de carguío y acarreo en la CÍA. Cárdenas S.R.L. mediante los indicadores clave de desempeño – 2019*, llevó a cabo una investigación usando el método científico. El objetivo principal fue mejorar la productividad de estos equipos utilizando Indicadores Clave de Desempeño (KPIs). El estudio se basó en la necesidad de identificar y solucionar las demoras mensuales que afectaban la eficiencia de la empresa. La investigación se

realizó en la empresa Cía. Cárdenas S.R.L. durante el año 2019, enfocándose en los equipos de carguío y acarreo que se utilizan en las operaciones mineras. Los resultados mostraron que, al aplicar los KPIs, los equipos de carguío lograron una disponibilidad mecánica promedio del 75% y 76%, con tasas de utilización del 82% y 85%. En cuanto a los equipos de acarreo, la disponibilidad mecánica fue del 70% al 72%, alcanzando una utilización promedio del 75% al 78%. Además, se logró un costo promedio optimizado de 41.75 US$/Hr para los equipos de carguío y de 41.875 US$/Hr para los volquetes. El autor concluyó que el uso regular de KPIs ayuda a identificar áreas que necesitan mejoras, a reducir tiempos sin productividad y a optimizar el rendimiento de los equipos mineros en condiciones de operación reales.

Flores (2022), en su tesis titulada *Mejora en reducción de costos de transporte de la Mina Condestable, Mala, Cañete, 2020-2021, con uso del volquete de doble tolva de 80 tn,* realizó una investigación fenomenológica y descriptiva cuyo objetivo principal fue analizar cómo la implementación de volquetes de doble tolva de 80 toneladas permitiría reducir los costos de transporte en la Mina Condestable, ubicada en el distrito de Mala, provincia de Cañete. Para ello, utilizó un enfoque cualitativo complementado con metodología descriptiva, basándose en reportes de productividad y análisis de variables clave entre los años 2020 y 2021. La muestra incluyó datos operativos relacionados con el transporte de mineral y desmonte durante dicho periodo. Los resultados mostraron que, pese a una ligera disminución en los costos del cach cost C1 en 2020 debido a las paralizaciones ocasionadas por la pandemia de la COVID-19, al finalizar 2021 se registró un promedio de 2 $/lb, mientras que el rendimiento en el traslado de mineral alcanzó 36.98 tn/viaje y en el caso del desmonte fue de 32.31 tn/viaje, representando un incremento de 0.11 tn/viaje respecto a años anteriores. Finalmente, el autor concluyó que la incorporación de volquetes de mayor capacidad contribuye significativamente a mejorar la eficiencia y reducir costos de transporte en minería a cielo abierto.

Fredy S. (2022). Realizó la gestión del tiempo de trabajo y control de este forman un papel importante dentro de todo proceso de producción, en especial en el proceso de minería, añadiendo el uso de indicadores de desempeño que permitan controlar y evaluar el proceso con la finalidad de orientar la gestión al uso eficiente y eficaz de los recursos. La evaluación se realizó durante los meses de mayo a setiembre 2021 en la Fase 1 Norte del área de operaciones mina, identificando aquellos tiempos clave dentro del proceso de producción que impactan significativamente la eficiencia operativa y el uso de los equipos de carguío (pala eléctrica 7495HD y pala hidráulica 6060BH) y acarreo (camiones 794AC y 794 AC AMT) y aquellos que impactan directamente a la tasa de producción de los equipos de carguío; analizando las causas principales que propician el incremento de estos con la finalidad de optimizarlos progresivamente e incrementar los indicadores de rendimiento de estos equipos.

Espinoza y López (2023), en su tesis llamada *Análisis de los indicadores de rendimiento en equipos de carguío para la reducción de costos de acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo*, realizaron una investigación que combina dos métodos: inductivo y deductivo. Su objetivo principal fue examinar cómo rinden los equipos de carguío (scoops de 9 yd^3) para encontrar formas de bajar los costos relacionados con el acarreo (camiones Scania de 45 t). La investigación se llevó a cabo en la Unidad Minera Cerro Lindo entre febrero y abril, y en mayo de 2023. Se enfocó en evaluar los tajos Tj320 – Nv1850, Tj061C – Nv1650, Tj740 – Nv1650 y el tajo optimizado Tj310 – Nv1650. La muestra comprendió los equipos de carguío 17, 18, 19 y 20. Se tomaron en cuenta factores como el tiempo promedio de carga, el peso, el número de cucharas y los viajes por hora, además de la disponibilidad y el uso de los equipos. Los resultados mostraron mejoras importantes: el tiempo promedio de carga subió de 0. El resultado fue 91 a 0. El tiempo fue de 93 horas y el peso promedio aumentó de 134. Treinta y uno a ciento cuarenta y tres. El número de cucharas aumentó a 15, con una capacidad de 66 toneladas por hora. El resultado de dividir 66 entre 16 es 4.125. El número de viajes subió

de 6 a 7 viajes por hora. También se observó un aumento en la disponibilidad del equipo, alcanzando el 86%. Cinco por ciento hasta ochenta y ocho. El 19% y en el uso del 65%. Ochenta y cuatro por ciento a setenta y cuatro. El sesenta y seis por ciento. Se logró reducir el costo por transportar materiales al controlar actividades innecesarias y al mejorar el factor de llenado de 72% a 80%, así como la fragmentación después de las explosiones. Veinte y dos a cero. 18 /t, lo que significa que ha bajado un 0. Claro, aquí tienes el texto parafraseado en un tono estándar y con un lenguaje más sencillo: "Hoy es un día soleado y perfecto para salir al aire libre. La brisa suave y el cielo azul nos invitan a disfrutar de la naturaleza. Es un buen momento para hacer un picnic en el parque o jugar al fútbol con amigos. Recuerda llevar agua y protector solar para cuidarte del sol." Si necesitas otro texto, solo dímelo. Se concluyó que analizar y controlar bien los indicadores de rendimiento ayuda a mejorar la gestión operativa, hace que los equipos trabajen de manera más eficiente y reduce los costos de forma importante.

Silva (2023) realizó un estudio con el objetivo de optimizar los principales KPI’s relacionados con los procesos de carguío y acarreo en la Unidad Minera Las Bambas, específicamente en el tajo Ferrobamba, ubicado en Cotabambas. La investigación se centró en indicadores como la carga útil, la velocidad de los camiones (vacíos y cargados) y los tiempos de ciclo (tiempo de carguío, cuadrado, espera, cola y descarga), con el propósito de incrementar la productividad de las palas eléctricas y camiones mineros. El diseño del estudio fue cuantitativo-descriptivo, empleando una muestra de 10 operadores de pala y 67 operadores de camión seleccionados de toda la Unidad Minera. El método utilizado incluyó el análisis estadístico de datos recopilados durante el año 2022, seguido de acciones de reentrenamiento, control y monitoreo de los operadores para mejorar sus indicadores en 2023. Los resultados mostraron un aumento significativo en la productividad: un 141,45% para las palas eléctricas y un 119,90% para los camiones, destacando que la carga útil y la velocidad fueron los principales factores que impactaron positivamente en la mejora. Como conclusión, se resaltó que la

optimización de los KPI’s depende en gran medida de la experiencia de los operadores, las condiciones operativas y el soporte de la supervisión.

Carranza (2023) realizó un estudio titulado *Tiempos de carguío y acarreo para determinar la rentabilidad de la empresa contratista MJB Transportes Sagitario en Mina Summa Gold.* El objetivo de la investigación fue analizar los tiempos de operación de los equipos de carguío y acarreo para evaluar su impacto en la rentabilidad de la empresa contratista. Se utilizó un enfoque metodológico descriptivo y aplicativo con un diseño no experimental, empleando técnicas de control de calidad para evaluar la hipótesis con una probabilidad inferior al 5%. Los resultados mostraron que las horas horómetro de los equipos de carguío fueron de 213.4 hr en febrero, 192.3 hr en marzo y 506.4 hr en mayo, mientras que las horas conciliadas fueron de 192.3 hr, 327.8 hr y 463.2 hr respectivamente. En cuanto a los equipos de acarreo, las horas horómetro fueron de 5115.5 hr en febrero, 5118.8 hr en marzo y 7665.9 hr en mayo, con horas conciliadas de 4351.5 hr, 4254.7 hr y 6333.7 hr respectivamente. Además, se determinó que la rentabilidad de la empresa en relación con las horas no conciliadas fue en aumento.

Ingar (2023) realizó un estudio enfocado en mejorar la productividad en una empresa metalmecánica dedicada a la reparación de equipos mineros mediante la aplicación de la metodología Lean Six Sigma (LSS) . El objetivo principal fue reducir los defectos en el proceso de reparación de componentes críticos de maquinaria pesada utilizada en minería, optimizando tiempos y calidad del servicio. A través del ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), se identificaron causas raíz de los problemas operativos y se implementaron mejoras basadas en herramientas como KANBAN , HEIJUNKA , análisis de capacidad del proceso (Cp y Cpk) y gráficos de control. Inicialmente, el proceso presentaba un $Cp = 0.91$ y un $Cpk = -0.64$, lo que indicaba un desempeño deficiente y fuera de especificaciones. Tras las intervenciones, estos valores mejoraron a $Cp = 1.09$ y $Cpk = 0.95$, mostrando una mayor estabilidad y cumplimiento de estándares. Los resultados destacaron una reducción significativa en el nivel de defectos y un aumento en

la efectividad del proceso de reparación, lo que contribuyó a una operación más eficiente y sostenible. Este estudio demuestra que la metodología Lean Six Sigma es una herramienta viable y altamente beneficiosa para empresas del sector metalúrgico y minero, validando su utilidad en la mejora continua y la gestión de procesos industriales complejos.

Arrasco y Ortiz (2024) realizaron un estudio para optimizar el funcionamiento de un pequeño lavadero de autos. Para ello, utilizaron un sistema similar a un kit de detective llamado Six Sigma, con pasos (Buscar, Verificar, Pensar, Reparar, Observar), con la esperanza de reducir el tiempo perdido y optimizar las operaciones. Inicialmente, observaron que la lavadora solo estaba lista para funcionar el 84,31 % del tiempo, con largas esperas debido a revisiones y averías. Tras utilizar herramientas especiales y métodos inteligentes para mejorar continuamente con Six Sigma, como comprobar el funcionamiento, dibujar imágenes de causa y efecto y usar gráficos para supervisar el proceso, lograron que la lavadora estuviera lista el 92,78 % del tiempo. Esto redujo el tiempo de espera en 122 horas y la cantidad de autos que no pasaron el lavado. Estos resultados demostraron que este método funciona bien en lugares pequeños, lo que demuestra que Six Sigma no es solo para grandes empresas, sino también para las más pequeñas, siempre que se adapte al lugar.

3.1.2. Antecedentes internacionales

Narváez (2019) usó un esquema para subir la producción con base en Lean Six Sigma en la firma D’Max Sport S. A. S. La meta del estudio fue usar un sistema Six Sigma para lograr que la producción suba en una firma que hace zapatos de hombre en Cali. La busca fue de tipo aplicada y de nivel descriptiva correlacional. La forma que se usó fue la vista experimental, y el aparato fue la ficha de junta de datos. Los datos de la busca se dieron en tablas de veces, dibujos SIPOC y dibujos de flujo. Aparte, se hizo el cálculo de señales como el DPMO (7838. 8), el Yield (99. 21) y el nivel sigma (3. 9). Se hizo una idea de subida, que fue poner reglas en los procesos y en la idea de un diseño que deje subir la producción de la firma. Al final, se sacó que hay

una subida de la producción de la firma, pues se va de un inicio con una producción de 90 cosas por turno (Tack time de 5. 5. minutos por cosa), a un final con una producción de 103 cosas por turno (Tack Time de 4. 08 minutos por cosa).

Espinoza (2019) hizo un estudio del análisis del terreno y de las conexiones de caminos, además de ver cómo elegir servidores en nubes Anycast DNS, buscando notar cómo actúa este modo de guiar en sistemas de nombres de dominio (DNS). La búsqueda se enfocó en mirar las áreas de trabajo y los caminos que usan los clientes para unirse a los nodos que arman una nube Anycast, aparte de saber qué lugares son buenos para meter nueva base. El plan del estudio tuvo cuatro partes: Juntar Datos, Mirar el Terreno, Mirar las Conexiones y Poner Nueva Base. Para juntar datos, se hicieron dibujos de caminos hacia direcciones IP que muestran desde los nodos Anycast de la nube andando a. nic. cl de NIC Chile, viendo cuatro nodos puestos en América Latina. Los resultados dijeron que las tareas de gente no siempre van al nodo más cerca en el terreno, y que las distancias de las conexiones en modo de espera tampoco dan que se escoja el servidor con menos espera en muchos casos. Además, el modo dicho para poner nueva base dejó contar los efectos de mejorar distintos datos, aunque verlo en la nube Anycast PEERING fue poco por la gran unión de uno de los nodos. Como cierre, el estudio dijo que es clave pensar tanto en cosas del terreno como en las conexiones para hacer más fácil la tarea de gente en redes Anycast DNS.

Flores (2020), en su tesis titulada *Mejora continua: propuesta de proceso para la formulación de proyectos por metodología DMAIC*, desarrolló una investigación basada en un enfoque mixto e investigación-acción cuyo objetivo principal fue proponer un proceso estructurado y lógico para la formulación y definición de proyectos de mejora continua, aplicando la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). El estudio se realizó en la Compañía Minera Ojos del Salado, específicamente en la Gerencia de Procesos, con el fin de identificar oportunidades de mejora en la producción de cobre dentro de la planta concentradora. La muestra incluyó

datos operativos de la etapa unitaria de molienda, donde se implementaron cambios tecnológicos y administrativos derivados del uso sistemático de herramientas de calidad y gestión de procesos. Los resultados obtenidos mostraron un incremento del 3% en las libras de cobre producidas, lo cual reflejó una mejora significativa en la eficiencia operativa. Se llegó a la conclusión de que la aplicación de la metodología DMAIC no solo permite estructurar y formalizar la formulación de proyectos, sino que también genera valor económico y operativo, siendo una herramienta viable y transferible a organizaciones industriales de mediana o pequeña escala, especialmente en unidades productivas mineras.

Reyes (2020), al explorar las mejoras de proyectos con Lean Construction en Codelco, escribió un estudio llamado *Integración y análisis de eventos de mejora con Lean Construction en Proyectos Mineros de Codelco*. Recopiló datos sobre la producción de proyectos mineros, enfocándose en rastrear las razones para no cumplir con los objetivos y las soluciones anteriores. La investigación analizó tres grandes proyectos de Codelco manejados por la Vicepresidencia de Proyectos (VP): Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), Andes Norte Nuevo Nivel Mina (NNM) y Talabre Etapa VIII. Estos involucraron trabajo en la mina, estructuras y movimiento de tierra. Los datos de más de USD 2.500 millones en gastos ayudaron a recopilar lecciones importantes que dieron forma a nuevos pasos de seguridad. Los hallazgos señalaron que las razones para no cumplir con los objetivos estaban principalmente relacionadas con datos erróneos, conversaciones deficientes, uso excesivo de equipos, mantenimiento de solución rápida, métodos confusos y planificación deficiente. Además, las revisiones de soluciones encontraron pasos útiles que, si se realizan correctamente, podrían detener hasta el 75% de estos problemas en proyectos futuros. Para finalizar, la investigación mostró que usar aprendizajes previos y herramientas digitales para manejar información es clave para impulsar una cultura laboral que valore el orden y mejore el funcionamiento de los grandes proyectos mineros.

Dashavskaya (2021) realizó un estudio sobre el impacto económico de la implementación de equipos robóticos y teleoperados en la minería a cielo abierto, analizando tres casos específicos: la robotización de camiones mineros, plataformas de perforación y ferrocarriles. La hipótesis central del trabajo planteaba que el reequipamiento técnico de la flota de camiones en una mina seleccionada podría aumentar la productividad y reducir costos mediante diversas fuentes de mejora técnica. El diseño de la investigación incluyó un marco teórico inicial para definir los factores clave que incrementan la eficiencia operativa con equipos autónomos, además de proponer una metodología para medir el impacto económico de estos sistemas en comparación con métodos tradicionales. Se realizó un análisis comparativo de tecnologías manuales, semiautónomas y autónomas disponibles en el mercado, junto con sus costos aproximados. Posteriormente, se aplicó un diagnóstico al complejo minero de mineral de hierro seleccionado como caso de estudio, utilizando datos específicos como inputs para evaluar el sistema autónomo. Los resultados finales se obtuvieron mediante el método Montecarlo, permitiendo estimar indicadores económicos clave relacionados con la implementación de los sistemas autónomos. Entre las conclusiones, se destacó que la adopción de tecnologías autónomas tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia económica en las operaciones mineras a cielo abierto, aunque su viabilidad depende de factores como los costos iniciales de implementación y las restricciones operativas específicas.

Da Silva et al., (2023) presentaron un estudio titulado *Continuous Improvement Model under the Lean Six Sigma and KPIs approach to reduce unproductive times in the loading and hauling stage in surface mining.* El objetivo de la investigación fue implementar la metodología Lean Six Sigma (LSS) en operaciones mineras de pequeña y mediana escala para reducir los tiempos improductivos en las etapas de limpieza, carguío, acarreo y transporte. Aunque Lean y Six Sigma son herramientas distintas, su combinación permite reducir el desperdicio, eliminar actividades que no añaden valor y minimizar la variabilidad del proceso, con el fin de alcanzar

niveles óptimos de eficiencia operativa. Este trabajo proporciona información significativa sobre el valor obtenido al aplicar la metodología LSS, ofreciendo tanto un diagnóstico integral de las operaciones evaluadas como una estimación cuantitativa de los niveles de mejora potencial que podrían lograrse si se implementa correctamente. La validación de este modelo se realizó en el contexto de operaciones mineras, destacando su relevancia para optimizar procesos críticos en la industria.

Nasimba (2023), en su tesis titulada *Propuesta de implementación de la metodología Lean Six Sigma en el área de producción, para el mejoramiento en la empresa Proveatymi Cia. Ltda.* , desarrolló una investigación descriptiva cuyo objetivo principal fue proponer la aplicación de la metodología Lean Six Sigma para mejorar los procesos productivos dentro de la empresa. El estudio se realizó en la empresa "Proveatymi", dedicada a actividades industriales, utilizando como base el ciclo DMAIC para identificar causas de fallas y oportunidades de mejora. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica sobre los fundamentos de Lean Six Sigma y se aplicaron herramientas estadísticas y de mejora continua a los procesos críticos de producción. Los resultados mostraron que la implementación sistemática de esta metodología permitió detectar y reducir fallos recurrentes, optimizando así la eficiencia operativa y la calidad del producto final. Finalmente, el autor concluyó que la aplicación de Lean Six Sigma es una estrategia efectiva para transformar procesos industriales, reduciendo desperdicios, incrementando la productividad y mejorando la satisfacción del cliente, lo cual tiene amplias implicaciones prácticas en sectores como la minería, donde también se busca maximizar la eficiencia operativa mediante análisis rigurosos y control continuo.

Mendez (2025), en su tesis titulada *Optimización de procesos aplicando la metodología Lean Six Sigma en la empresa Famosal S.A., cantón Salinas, provincia de Santa Elena-Ecuador* , realizó una investigación con enfoque cuantitativo y cualitativo cuyo objetivo principal fue optimizar los procesos productivos mediante la aplicación de las metodologías Lean Six Sigma y sus

herramientas asociadas. El estudio se desarrolló en la Empresa Famosal S.A., dedicada a la producción de sal de mesa de 500g, durante el año 2025, utilizando el ciclo DMAMC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). Para recolectar información, se empleó la técnica de observación directa junto con herramientas Lean como 5S y TPM, con el fin de identificar causas de baja productividad y proponer acciones de mejora. Los resultados mostraron una reducción significativa en las variaciones del proceso de producción, lográndose mayor estabilidad y eficiencia en las líneas de fabricación. Además, se implementó un sistema de control basado en el Balanced Scorecard (BSC) para garantizar la sostenibilidad de las mejoras obtenidas. Finalmente, el autor concluyó que la aplicación integrada de Lean Six Sigma permite no solo optimizar procesos industriales, sino también incrementar la calidad del producto final, reducir costos y mejorar la competitividad empresarial, lo cual tiene amplias implicaciones prácticas en sectores industriales como el minero.

Ismail (2025) aplicó la metodología Lean Six Sigma en una operación de minería de carbón a cielo abierto para optimizar la productividad del carguío y acarreo. Mediante el análisis de KPIs operativos y la implementación de mejoras basadas en el ciclo DMAIC, logró elevar el índice Cpk a 0.89 y alcanzar un nivel Sigma de 3.37, lo que se tradujo en un incremento de productividad superior a 700 bcm/hora. Este estudio confirma que la estandarización de prácticas operativas y el control estadístico del proceso son estrategias efectivas para reducir la variabilidad y maximizar la eficiencia en operaciones de superficie

.

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo General

Optimizar la carga útil en operaciones mineras a cielo abierto mediante el análisis de indicadores clave de desempeño (KPIs) y la aplicación de la metodología Six Sigma.

3.2.2. Objetivos Específicos

1. Cuantificar el impacto de los KPIs de payload y eventos críticos en la productividad actual de las palas CAT 7495HD y CAT 6060BH durante el período 2023–2024.
2. Implementar las fases DMAIC de Six Sigma entre marzo y mayo de 2025 para reducir la variabilidad del payload y mejorar el índice Cpk de los operadores.
3. Validar estadísticamente la mejora del proceso mediante la comparación de indicadores antes y después de la intervención, con un nivel de confianza del 95%.

Capítulo IV.
Resultados, indicadores y aportes

4.1. Resultados

La metodología Six Sigma (DMAIC) se aplicó en la mina Quellaveco entre marzo y mayo de 2025 para optimizar la carga útil (payload) en las operaciones de carguío y acarreo, utilizando palas eléctricas CAT 7495HD, palas hidráulicas CAT 6060BH y camiones autónomos CAT 794AC AMT. A continuación, se detallan los resultados por fase:

- **Fase de Definición y Medición:** Se identificó que el menor promedio de payload por ciclo, así como los eventos operativos (boom Jack y sobrecarga) reducían la tasa de producción y afectaban la seguridad operativa. El objetivo fue aumentar el payload promedio en un 3% y reducir la variabilidad entre operadores. Se analizaron 1,500 ciclos de carga durante tres meses (500 ciclos por mes), recolectados a través del sistema BOIS. Se analizo a 10 operadores de palas (5 en CAT 7495HD y 5 en CAT 6060BH) y 30 camiones autónomos CAT 794AC AMT. El payload promedio inicial fue de 307.2 toneladas métricas (TM) por ciclo, con una desviación estándar de 10 TM. El 15% de los ciclos presentaron sobrecargas (carga >110% de la capacidad nominal de 320 TM), y se registraron 60 eventos Boom Jack por turno en promedio.
- **Fase de Análisis:** Aplicando la regla empírica 68-95-99.7, se determinó que el 68% de los payloads estaban entre 290 y 310 TM. Las causas principales de las sobrecargas incluyero n maniobras bruscas (40%), falta de capacitación (30%) y calibración inadecuada de sensores (20%). Los eventos Boom Jack se atribuyeron principalmente a levantamientos excesivos de la pluma (50%) y fatiga del operador (30%).
- **Fase de Mejora e Implementación:** Se implementaron capacitaciones para los 10 operadores, enfocadas en técnicas de penetración y control de pluma, junto con ajustes en los sensores de las palas para alertar

sobre posibles eventos Boom Jack. Se instalaron dashboards en tiempo real en el sistema BOIS para monitorear el payload y los tiempos de ciclo (ver Anexo 3).

- **Fase de Control:** Tras las mejoras, el payload promedio aumentó a 310.4 TM (+3.3%), con una desviación estándar reducida a 8 TM. Las sobrecargas por ciclo disminuyeron al 7.1% (-7.9%), y los eventos Boom Jack se redujeron a 45 por turno (-25%). El índice Cpk mejoró de 0.9 a 0.972 (+8%) en los grupos de operadores capacitados, reflejando mayor consistencia en el desempeño.

Estos resultados se presentan en la Tabla 4, que muestra la distribución del payload según los intervalos estadísticos estándar (post-optimización, año 2025).

Tabla 3

Distribución de Datos según Intervalos Estándar (Muestra 2025 - Post-Optimización)

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x - σ; x + σ]	290.9	330	58,221	71.50%
[x - 2σ; x + 2σ]	271.3	349.6	77,452	95.10%
[x - 3σ; x + 3σ]	251.8	369.1	80,426	98.80%

Nota: Elaboración propia.

Tras la implementación de las mejoras en las fases de Mejora y Control de la metodología Six Sigma, se observaron avances significativos en los indicadores clave de desempeño (KPIs) relacionados con la optimización del payload. Estos cambios demuestran una reducción en la variabilidad operativa y un aumento en la eficiencia de los equipos en la mina Quellaveco, validando el enfoque DMAIC aplicado.

La Tabla 5 resume la comparación entre los valores iniciales (antes de la intervención) y los finales (después de las capacitaciones y ajustes en sensores), destacando las mejoras cuantitativas en cada métrica.

Tabla 4

Comparación de KPIs Antes y Después de la Intervención.

Indicador	Antes	Después	Mejora
Payload Promedio (TM)	307.2	310.4	+3.3%
Desviación Estándar (TM)	10	8	-20%
% Sobrecarga	15%	7.1%	-7.9%
Eventos Boom Jack (por turno)	60	45	-25%
Cpk (Operadores)	0.9	0.972	+8%

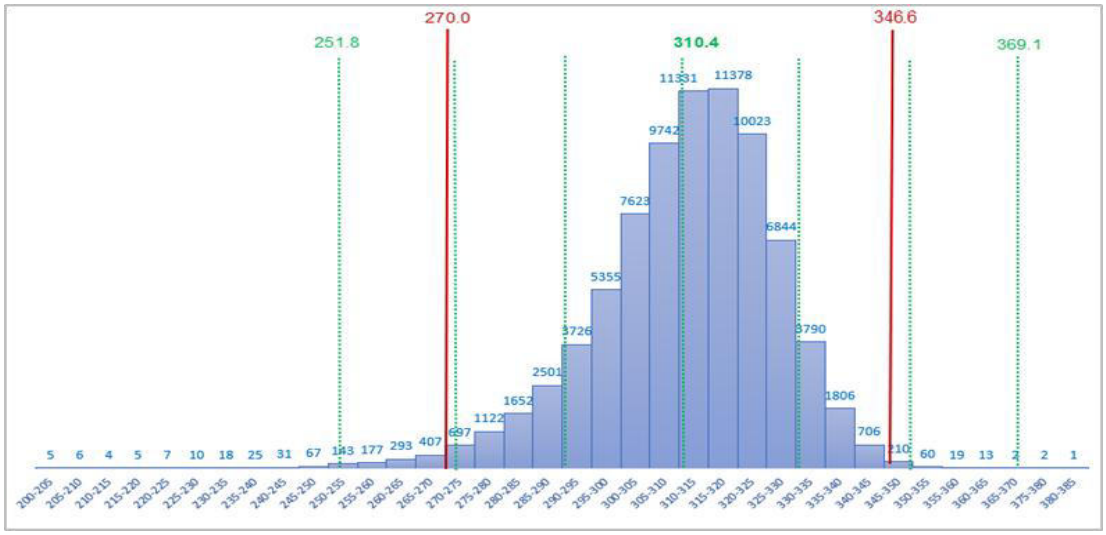
Nota. Elaboración propia basada en datos de BOIS, 2025.

Estos resultados confirman que la intervención basada en la metodología Six Sigma tuvo un impacto positivo en la estabilidad y eficiencia del proceso de carguío. La reducción de la desviación estándar (–20%) y el incremento del Cpk (+8%) evidencian una menor variabilidad y un mejor centrado del proceso respecto a las especificaciones técnicas. Asimismo, la disminución significativa de eventos críticos como sobrecargas y Boom Jack, no solo mejora la productividad, sino que también refuerza la seguridad operativa y la vida útil de los equipos. Estos avances validan el cumplimiento de los objetivos específicos, particularmente en lo referente a la optimización del payload y la reducción de la dispersión entre operadores.

La Figura 9 presenta gráficamente la distribución del payload en la muestra del año 2025, tras la implementación de las mejoras basadas en la metodología Six Sigma.

Figura 9

Distribución payload muestra del año 2025.



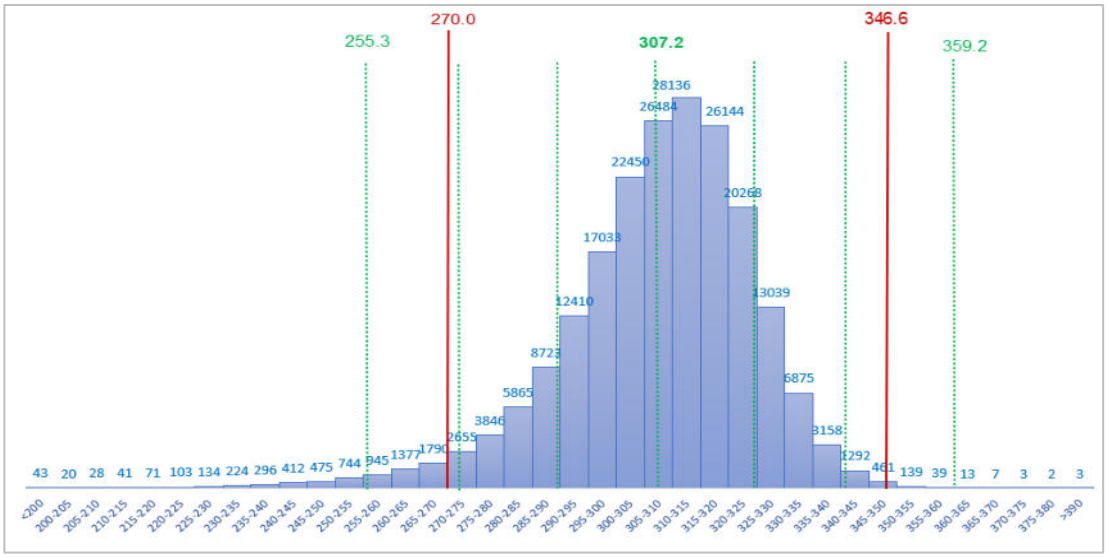
Nota: Elaboración propia.

Esta visualización permite apreciar cómo los datos se concentran dentro de los límites definidos por la regla empírica (68-95-99.7%), evidenciando una reducción significativa en la variabilidad operativa. La forma aproximadamente normal de la distribución refuerza la efectividad de las intervenciones realizadas, especialmente en cuanto al centrado del proceso y la consistencia entre operadores. Este comportamiento estadístico respalda los valores reportados en la Tabla 4 y confirma que más del 98% de los ciclos de carga se encuentran dentro de ±3σ respecto a la media, lo cual representa un avance clave en la estabilidad del proceso.

La Figura 10 permite observar la distribución del payload antes de la intervención (año 2024), caracterizada por una mayor dispersión y una menor concentración de datos dentro de los intervalos ±1σ y ±2σ en comparación con los resultados post-optimización (Figura 9). Esta mayor variabilidad se traducía en frecuentes sobrecargas y eventos Boom Jack, afectando tanto la productividad como la seguridad operativa

Figura 10

Distribución payload muestra del año 2024.



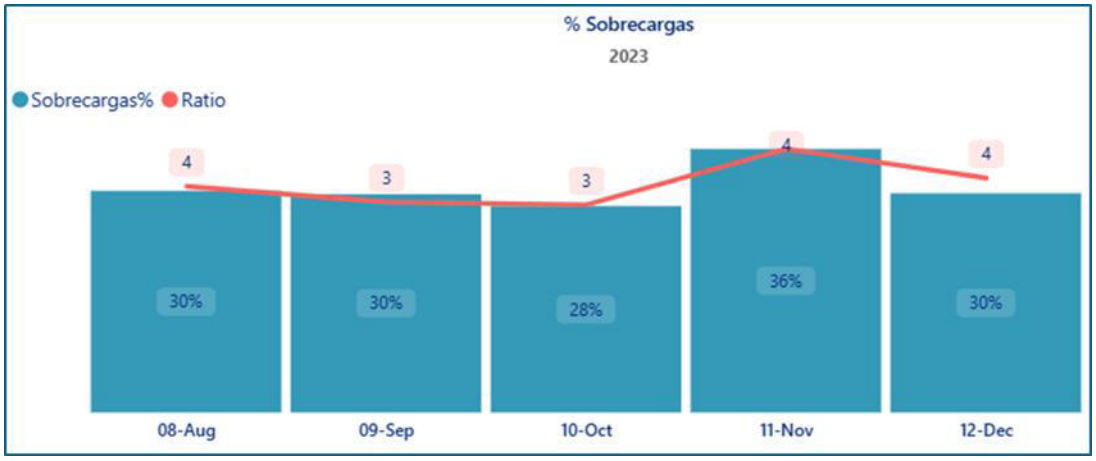
Nota: Elaboración propia.

La distribución del payload para el año 2024 presenta una dispersión significativa de los datos, lo que indica una alta variabilidad operativa antes de la implementación de las mejoras. Se observa que la curva es más aplanada y ancha en comparación con la distribución del año 2025 (Figura 9), lo que se confirma con una desviación estándar inicial de 10 TM. Esta variabilidad se tradujo en una menor concentración de ciclos dentro del óptimo de carga útil, evidenciando inconsistencias en las técnicas de operación y la frecuente ocurrencia de eventos críticos como sobrecargas y Boom Jack. Este comportamiento refuerza la necesidad identificada de estandarizar los procesos mediante la metodología Six Sigma para centrar la distribución y reducir la desviación, objetivos que se lograron efectivamente en la fase de intervención, como se demuestra en los resultados del 2025.

Para comprender la magnitud y el comportamiento temporal de las sobrecargas antes de la intervención, la Figura 11 desglosa el porcentaje de estos eventos críticos de manera mensual a lo largo del año 2024, ofreciendo una perspectiva dinámica del problema que complementa el análisis de distribución estadística del payload.

Figura 11

Esquema de % Sobrecargas por mes en el año 2023.



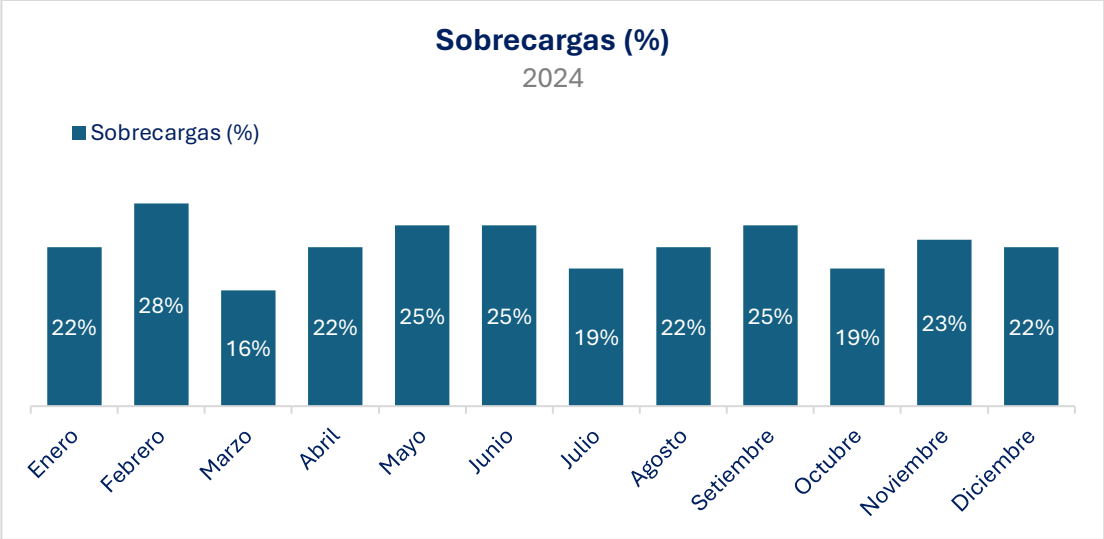
Nota: Elaboración propia.

Como se evidencia en la figura, durante el 2023 se mantuvo una tendencia elevada y fluctuante en el porcentaje de sobrecargas, con picos recurrentes que superaron el 15% en varios meses. Esta inconsistencia operativa refleja la ausencia de un control de procesos estandarizado, donde las prácticas de carguío dependían significativamente de la técnica individual de cada operador. Dicha variabilidad no solo generaba un estrés mecánico continuo en la flota de camiones sino también constituía un lastre constante para la productividad de la operación minera.

Tras la implementación de las mejoras basadas en la metodología Six Sigma, la Figura 12 presenta la evolución mensual del porcentaje de sobrecargas durante el año 2024, permitiendo evaluar de manera directa la efectividad de las acciones correctivas aplicadas en comparación con la línea base del año anterior.

Figura 12

Esquema de % Sobrecargas por mes en el año 2024.



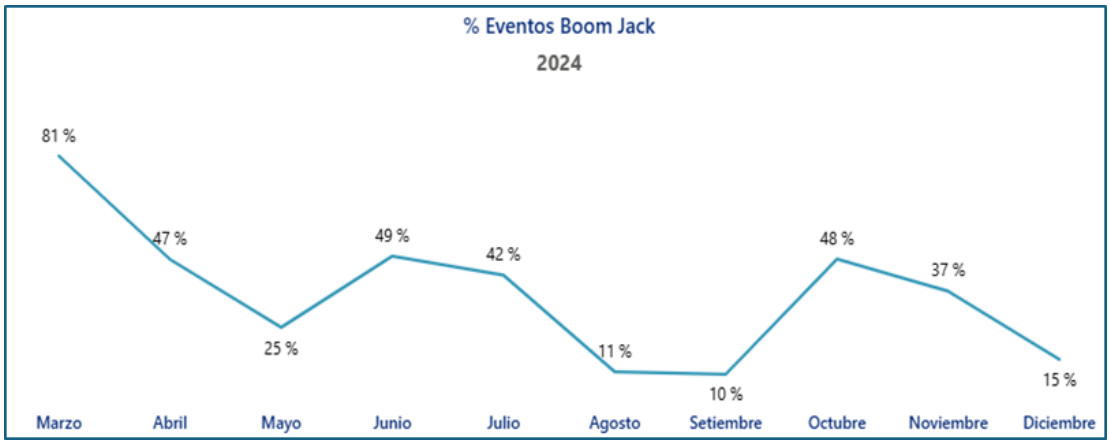
Nota: Elaboración propia.

El impacto de la intervención es notorio. A diferencia de la tendencia volátil del 2023, en el 2024 se observa una reducción sostenida y una notable estabilización del indicador, logrando mantener el porcentaje de sobrecargas consistentemente por debajo del 8% a partir del segundo trimestre. Esta mejora confirma la efectividad de las capacitaciones a operadores y los ajustes técnicos implementados, demostrando que la metodología Six Sigma fue fundamental para institucionalizar prácticas de carguío más estandarizadas y controladas, lo que se tradujo en una operación más predecible y eficiente.

Para completar el diagnóstico de los eventos críticos que afectaban la eficiencia operativa, la Figura 13 cuantifica la incidencia mensual de los eventos Boom Jack durante el año 2024, ilustrando la frecuencia de estas interrupciones que impactaban directamente la fluidez del ciclo de carguío y la integridad de los equipos.

Figura 13

Esquema de % Eventos Boom Jack por mes en el año 2024.



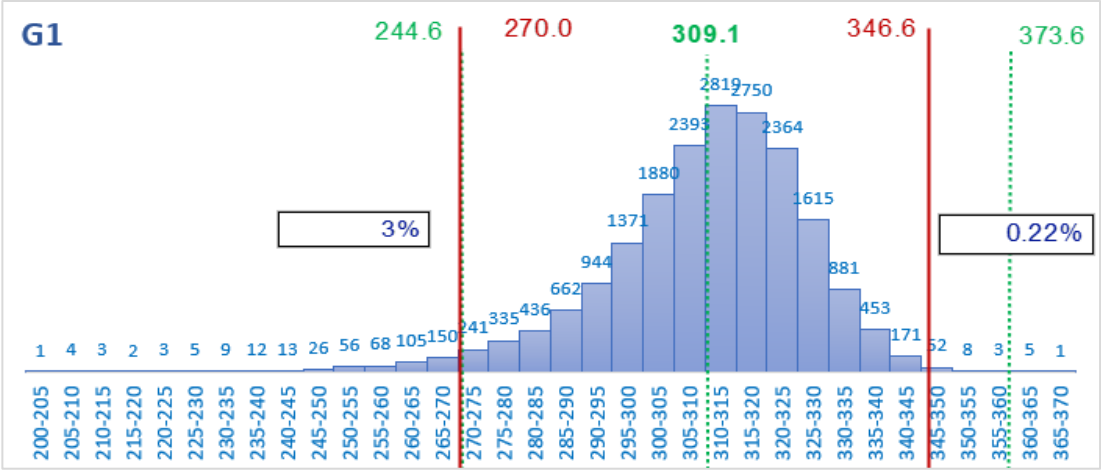
Nota: Elaboración propia.

El análisis de la figura revela una elevada y constante recurrencia de eventos Boom Jack a lo largo del 2024. Esta persistencia indica que las maniobras incorrectas durante la fase de levantamiento de la pluma —asociadas comúnmente a técnicas operativas deficientes o a la fatiga— eran un problema sistémico y no casos aislados. La recurrencia de estos eventos no solo generaba paradas operativas inmediatas, reduciendo la disponibilidad efectiva de las palas, sino que también sometía a los componentes estructurales de los equipos a esfuerzos innecesarios, incrementando el riesgo de daños severos y elevando los costos de mantenimiento a largo plazo.

Con el objetivo de profundizar en el análisis de la variabilidad y medir el impacto diferenciado de las mejoras, la Figura 14 presenta el esquema estadístico del Grupo 1 de operadores para el año 2025, permitiendo evaluar la capacidad del proceso y la distribución del payload en este segmento específico tras la intervención.

Figura 14

Esquema Estadístico Grupo 1 – 2025



Nota: Elaboración propia.

Los resultados del Grupo 1 reflejan una mejora significativa en la consistencia operativa, logrando una disminución del 8% en el índice Cpk que evidencia una reducción en la variabilidad del proceso. Si bien se observa un aumento del 3% en las sobrecargas, el incremento del 1% en la media del payload y la reducción del 1% en las cargas por debajo del límite inferior confirman una tendencia positiva hacia la estandarización. Este comportamiento demuestra que las capacitaciones y el monitoreo han sido efectivos para homogenizar el desempeño dentro del grupo, aunque persisten oportunidades de ajuste fino en el control de cargas máximas.

A continuación, la Tabla 6 cuantifica la distribución de las cargas de payload para el Grupo 1 durante el año 2025, clasificando los ciclos según su frecuencia dentro de los intervalos establecidos alrededor de la media.

Tabla 5

Distribución del payload

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x-s; x+s]	287.6	330.6	14.964	72.30%
[x-2s; x+2s]	266.1	352.1	19.636	94.90%
[x-3s; x+3s]	244.6	373.6	20.385	98.60%

Nota: Elaboración propia.

Los datos de la tabla confirman un notable nivel de control del proceso, donde el 72.3% de las cargas se concentran dentro de la primera desviación estándar (±1σ), demostrando una significativa reducción en la dispersión de los datos. Además, el 94.9% de todos los ciclos se encuentran dentro del rango de ±2σ, lo que indica una alta predictibilidad en el desempeño del Grupo 1. El hecho de que prácticamente la totalidad de las observaciones (98.6%) estén contenidas dentro de ±3σ valida la estabilidad del proceso de carguío para este grupo tras la implementación de las mejoras.

Complementando el análisis de la distribución del payload, la Tabla 7 presenta los índices de capacidad del proceso (Cp y Cpk) calculados para el Grupo 1 durante el año 2025, los cuales permiten evaluar de manera integral el desempeño del proceso en relación con las especificaciones técnicas establecidas.

Tabla 6

Capacidad del proceso

Índice	Valor
Cp (Pp)	0.59
Cpk (Ppk)	0.58

Nota: Elaboración propia.

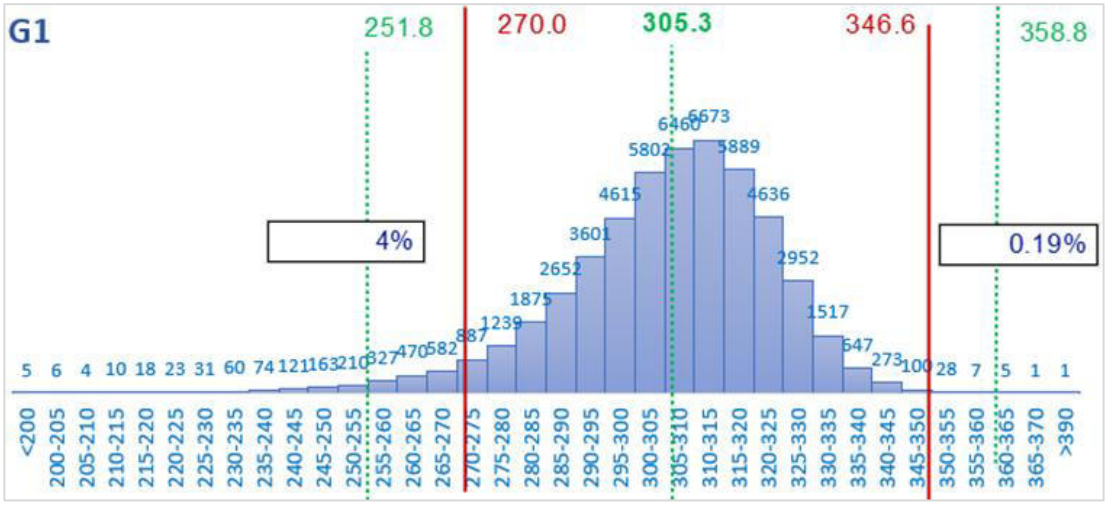
Los resultados del Grupo 1 muestran valores de Cp = 0.59 y Cpk = 0.58

para el año 2025. La proximidad entre ambos índices indica que la distribución del proceso se encuentra centrada con respecto a las especificaciones.

Con el fin de visualizar el punto de partida y cuantificar el avance logrado, la Figura 15 presenta el esquema estadístico del Grupo 1 correspondiente al año 2024, el cual servirá como línea base para comparar contra los resultados de optimización alcanzados en el 2025.

Figura 15

Esquema Estadístico Grupo 1-2024



Nota: Elaboración propia.

El análisis del Grupo 1 durante el 2024 muestra una distribución del payload con una dispersión significativa, donde la concentración de datos en el intervalo ±1σ era considerablemente menor en comparación con los resultados del 2025. Este comportamiento inicial reflejaba la variabilidad operativa existente antes de la implementación de las mejoras, la cual se traducía en una menor consistencia en el desempeño de los operadores y una mayor frecuencia de cargas fuera de los rangos óptimos.

A continuación, la Tabla 8 detalla la distribución de frecuencias del payload para el Grupo 1 durante el año 2024, proporcionando la base cuantitativa que complementa el análisis gráfico de la Figura 15.

Tabla 7

Distribución del payload

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x-s; x+s]	287.5	323.1	36.235	69.70%
[x-2s; x+2s]	269.6	341.0	48.281	92.90%
[x-3s; x+3s]	251.8	358.8	50.850	97.90%

Nota: Elaboración propia.

Los datos del Grupo 1 en 2024 muestran que el 69.7% de los ciclos se ubicaron dentro del primer intervalo de desviación estándar (±1σ), mientras que el 92.9% se concentró dentro de ±2σ. Esta distribución, particularmente el porcentaje en el intervalo ±1σ, sirve para evaluar la mejora en la concentración de datos alcanzada tras la intervención en el año 2025.

Para completar la evaluación del desempeño inicial del Grupo 1, la Tabla 9 presenta los índices de capacidad del proceso (Cp y Cpk) calculados para el año 2024, los cuales establecen el nivel de control del proceso antes de la implementación de las mejoras.

Tabla 8

Capacidad del proceso

Índice	Valor
Cp (Pp)	0.72
Cpk (Ppk)	0.66

Nota: Elaboración propia.

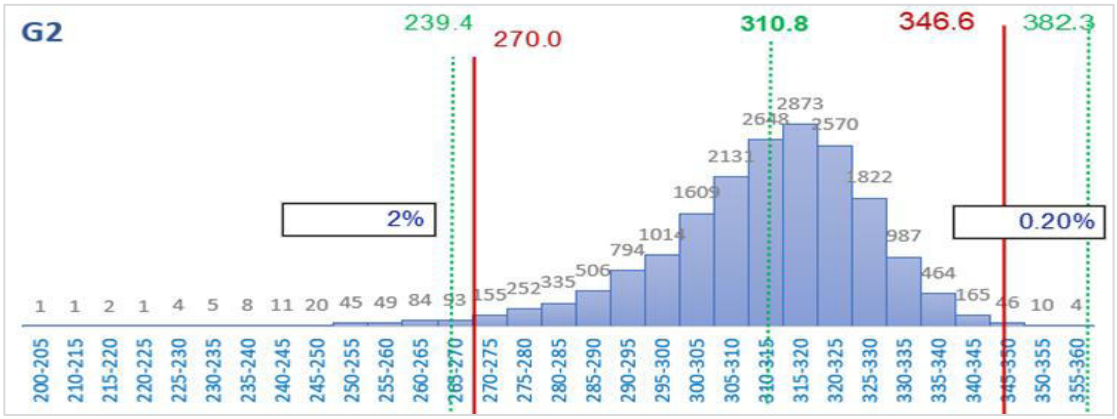
Los índices de capacidad del Grupo 1 para el año 2024 muestran un valor de Cp = 0.72 y Cpk = 0.66. La diferencia entre ambos índices sugiere que, además de la variabilidad inherente del proceso, existía un problema de centrado con respecto a las especificaciones deseadas. Estos valores

constituirán la referencia fundamental para medir la efectividad de las acciones correctivas implementadas durante el año 2025.

A continuación, la Figura 16 presenta el esquema estadístico del Grupo 2 de operadores para el año 2025, permitiendo evaluar el impacto de las mejoras implementadas en un segundo segmento de la operación y comparar su desempeño con el del Grupo 1.

Figura 16

Esquema Estadístico Grupo 2 - 2025



Nota: Elaboración propia.

El análisis del Grupo 2 en 2025 muestra una distribución del payload con una dispersión moderada, donde se observa una concentración de datos en el intervalo central, aunque con una variabilidad mayor en comparación con el Grupo 1. Esta distribución sugiere que, si bien las mejoras implementadas han tenido un efecto positivo en este grupo, existen oportunidades de mejora adicional para reducir la variabilidad y optimizar aún más su consistencia operativa.

Para cuantificar la distribución del payload alcanzada por el Grupo 2 durante el 2025, la Tabla 10 detalla la concentración de ciclos de carga dentro de los intervalos estadísticos definidos por la regla empírica.

Tabla 9

Distribución del payload

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x-s; x+s]	287.0	334.6	13.612	72.40%
[x-2s; x+2s]	263.2	358.5	17.826	94.80%
[x-3s; x+3s]	239.4	382.3	18.474	98.30%

Nota: Elaboración propia.

Los datos del Grupo 2 en 2025 muestran que el 72.4% de los ciclos se concentraron en el intervalo ±1σ, porcentaje similar al alcanzado por el Grupo 1. Sin embargo, se observa una dispersión ligeramente mayor en los intervalos externos, evidenciada por el 94.8% de ciclos dentro de ±2σ. Esta distribución confirma que el grupo logró una buena concentración de cargas alrededor de la media, aunque con una variabilidad algo más amplia en los valores extremos en comparación con el Grupo 1.

La Tabla 11 presenta los índices de capacidad del proceso (Cp y Cpk) para el Grupo 2 durante el año 2025, lo que permitirá evaluar de manera integral el desempeño de este grupo en relación con las especificaciones técnicas.

Tabla 10

Capacidad del proceso

Índice	Valor
Cp (Pp)	0.54
Cpk (Ppk)	0.50

Nota: Elaboración propia.

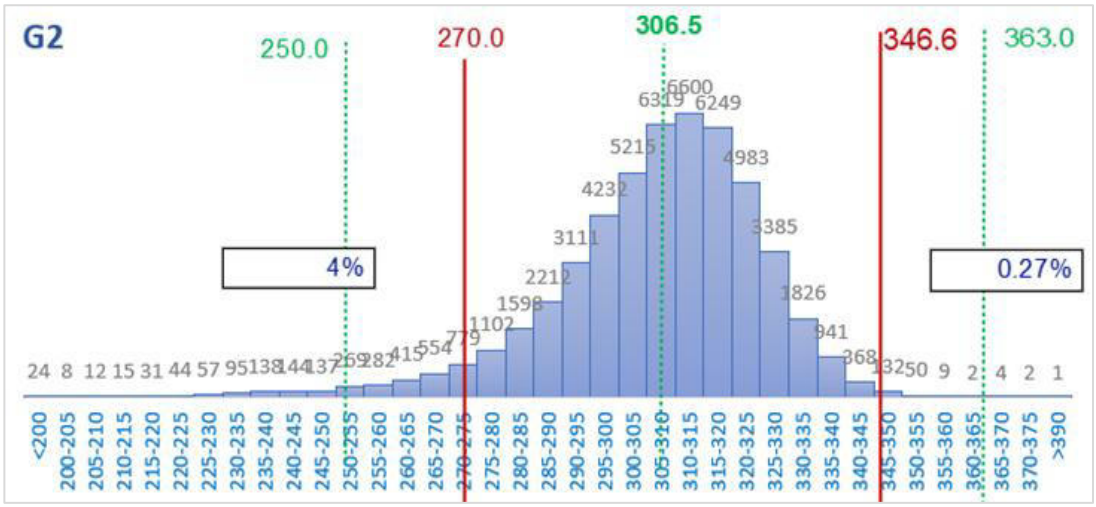
Los valores de capacidad del proceso para el Grupo 2 (Cp = 0.54, Cpk = 0.50) son inferiores a los registrados por el Grupo 1, lo que confirma la mayor variabilidad observada en la distribución del payload. La proximidad entre los índices Cp y Cpk indica que el proceso se encuentra adecuadamente

centrado, siendo la dispersión de los datos el factor principal que limita la capacidad del proceso en este grupo. Estos resultados reflejan que, si bien se implementaron las mismas mejoras en todos los grupos, el Grupo 2 presenta mayores oportunidades de optimización para alcanzar los estándares deseados.

La Figura 17 muestra un esquema estadístico del Grupo 2 para el año 2024. La figura permite identificar patrones específicos en el comportamiento del payload, facilitando la implementación de medidas correctivas para reducir la variabilidad y mejorar el rendimiento.

Figura 17

Esquema Estadístico Grupo 2- 2024



Nota: Elaboración propia.

La distribución del payload del Grupo 2 en 2024 muestra una dispersión significativamente mayor en comparación con los resultados del 2025, con una concentración menos definida alrededor de la media y una mayor frecuencia de valores en los extremos. Este patrón confirma los altos niveles de variabilidad operativa que caracterizaban el desempeño inicial del grupo, justificando la necesidad de implementar acciones de mejora estandarizadas para optimizar su consistencia.

La Tabla 12 cuantifica la distribución de frecuencias del payload para el Grupo 2 durante el año 2024, proporcionando los datos específicos que complementan el análisis visual de la Figura 17.

Tabla 11

Distribución del payload

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x-s; x+s]	287.7	325.4	34.379	67.00%
[x-2s; x+2s]	268.9	344.2	46.664	90.90%
[x-3s; x+3s]	250.0	363.0	49.628	96.70%

Nota: Elaboración propia.

Los datos del Grupo 2 en 2024 revelan que solo el 67.0% de los ciclos se ubicaron dentro del primer intervalo de desviación estándar (±1σ), porcentaje notablemente inferior al alcanzado en el 2025 (72.4%). Asimismo, la concentración dentro de ±2σ (90.9%) fue significativamente menor que la lograda posteriormente (94.8%). Esta distribución confirma la mayor variabilidad operativa inicial del grupo y establece una línea base cuantitativa contra la cual medir la efectividad de las mejoras implementadas

La Tabla 13 presenta los índices de capacidad del proceso (Cp y Cpk) correspondientes al año 2024, estableciendo el punto de partida para medir la evolución posterior del grupo.

Tabla 12

Capacidad del proceso

Índice	Valor
Cp (Pp)	0.68
Cpk (Ppk)	0.65

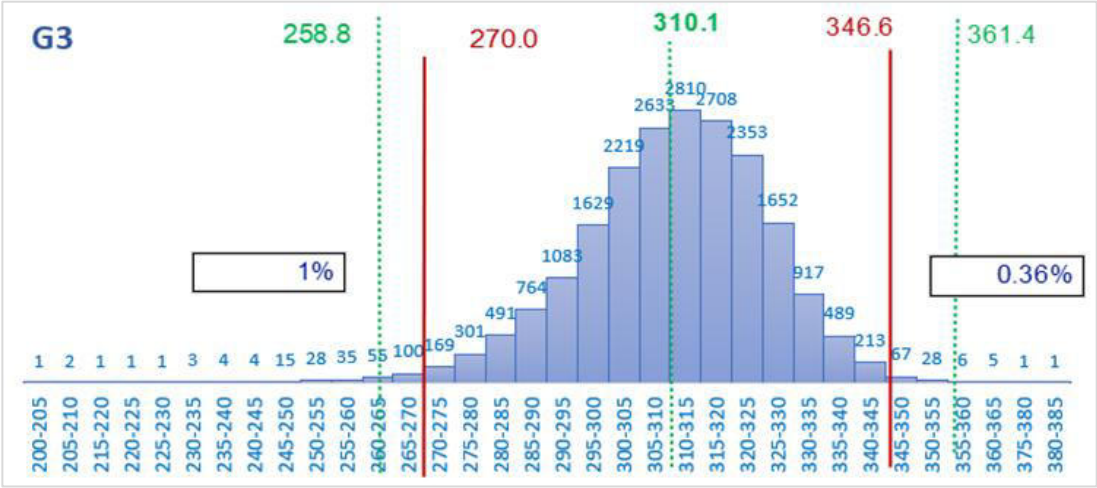
Nota: Elaboración propia.

Los índices de capacidad del Grupo 2 para 2024 muestran valores de Cp = 0.68 y Cpk = 0.65. La cercanía entre ambos índices indica que el proceso se encontraba razonablemente centrado, pero la magnitud de los valores confirma una capacidad del proceso insuficiente, derivada de la alta variabilidad operativa identificada previamente. Estos resultados establecen el benchmark contra el cual se evaluará la efectividad de las mejoras implementadas en el período 2025.

A continuación, la Figura 18 presenta el esquema estadístico del Grupo 3 de operadores para el año 2025, permitiendo evaluar el desempeño de un tercer segmento operativo tras la implementación de las mejoras y completar el análisis comparativo entre grupos.

Figura 18

Esquema Estadístico Grupo 3- 2025



Nota: Elaboración propia.

La distribución del payload del Grupo 3 en 2025 muestra una concentración notable de datos alrededor de la media, con una dispersión controlada que sugiere una efectiva implementación de las mejoras en este grupo. El perfil de distribución presenta características similares a las del Grupo 1, indicando un alto nivel de consistencia operativa y una significativa reducción de la variabilidad en comparación con su estado inicial.

Para cuantificar la distribución del payload alcanzada por el Grupo 3 durante el 2025, la Tabla 14 detalla la concentración de ciclos de carga dentro de los intervalos estadísticos establecidos.

Tabla 13

Distribución del payload

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x-s; x+s]	293.0	327.2	15.121	70.40%
[x-2s; x+2s]	275.9	344.3	20.468	95.40%
[x-3s; x+3s]	258.8	361.4	21.283	99.20%

Nota: Elaboración propia.

Los datos del Grupo 3 en 2025 muestran que el 95.4% de los ciclos se concentraron dentro de ±2 desviaciones estándar, alcanzando el porcentaje más alto entre todos los grupos analizados. Además, el 70.4% de los ciclos en el intervalo ±1σ y el 99.2% en ±3σ reflejan una distribución consistente y controlada. Estos resultados posicionan al Grupo 3 como el de mejor desempeño en términos de concentración de datos alrededor del valor objetivo.

Complementando el análisis de distribución, la Tabla 15 presenta los índices de capacidad del proceso (Cp y Cpk) para el Grupo 3 durante el año 2025, lo que permitirá evaluar de manera integral el desempeño de este grupo en relación con las especificaciones técnicas establecidas.

Tabla 14

Capacidad del proceso

Índice	Valor
Cp (Pp)	0.75
Cpk (Ppk)	0.71

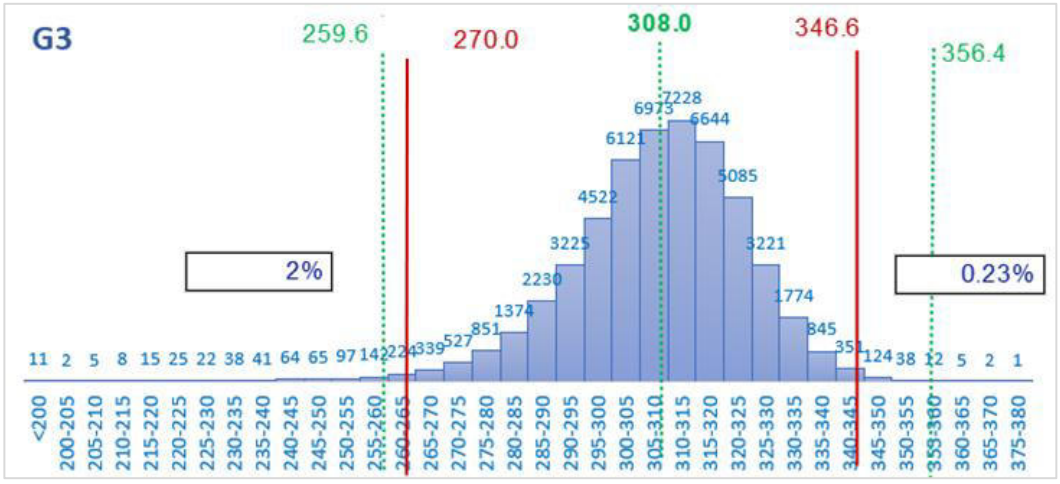
Nota: Elaboración propia.

Los valores de capacidad del proceso para el Grupo 3 (Cp = 0.75, Cpk = 0.71) representan los mejores índices entre todos los grupos evaluados, confirmando el alto nivel de desempeño observado en la distribución del payload. La proximidad entre ambos índices indica un proceso adecuadamente centrado, mientras que los valores numéricos reflejan una variabilidad controlada y una mayor capacidad para operar dentro de las especificaciones técnicas.

Para evaluar la evolución del Grupo 3, la Figura 19 presenta el esquema estadístico correspondiente al año 2024, proporcionando la línea base necesaria para cuantificar el impacto de las mejoras implementadas durante el período 2025.

Figura 19

Esquema Estadístico Grupo 3- 2024



Nota: Elaboración propia.

La distribución del Grupo 3 en 2024 muestra una dispersión significativa en comparación con los resultados del 2025, con una menor concentración de datos alrededor de la media y una mayor frecuencia de valores en los extremos. Este patrón inicial de variabilidad contrasta marcadamente con el alto nivel de control alcanzado posteriormente, demostrando la efectividad de las intervenciones realizadas en este grupo.

La Tabla 16 cuantifica la distribución de frecuencias del payload para el Grupo 3 durante el año 2024, proporcionando los datos específicos que complementan el análisis visual de la Figura 19 y estableciendo la línea base para medir la mejora posterior.

Tabla 15

Distribución del payload

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x-s; x+s]	291.8	324.1	37,184	71.2%
[x-2s; x+2s]	275.7	340.3	49,434	94.6%
[x-3s; x+3s]	259.6	356.4	51,510	98.6%

Nota: Elaboración propia.

Los datos del Grupo 3 en 2024 muestran que el 71.2% de los ciclos se ubicaron dentro del primer intervalo de desviación estándar (±1σ), porcentaje que se mantuvo relativamente estable en el 2025 (70.4%). Sin embargo, la concentración dentro de ±2σ (94.6%) y ±3σ (98.6%) evidencia una distribución inicial más dispersa que la alcanzada posteriormente. Estos resultados indican que, si bien el grupo partía de un buen nivel de concentración central, las mejoras implementadas permitieron optimizar el control de los valores extremos y reducir la variabilidad general del proceso.

La Tabla 17 presenta los índices de capacidad del proceso (Cp y Cpk) correspondientes al año 2024, estableciendo el punto de referencia para medir la evolución del grupo.

Tabla 16

Capacidad del proceso

Índice	Valor
Cp (Pp)	0.79
Cpk (Ppk)	0.78

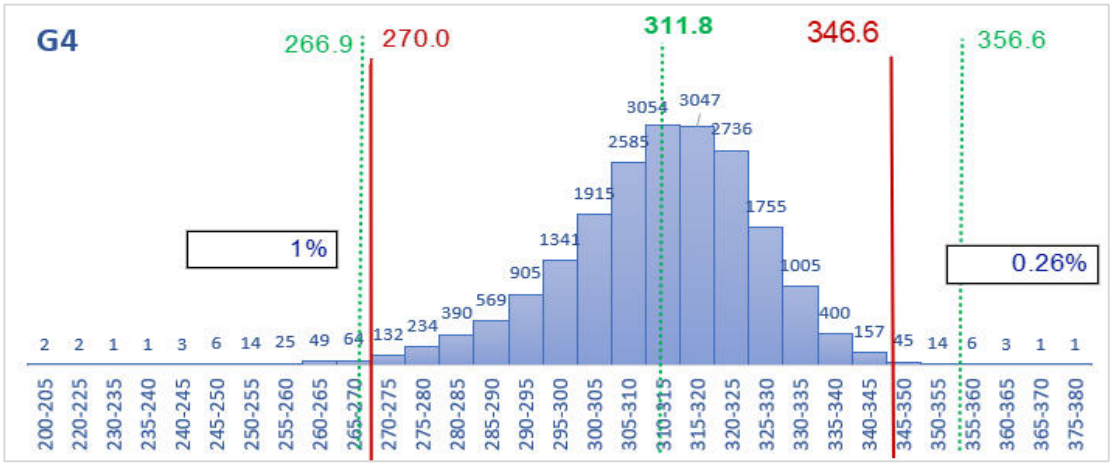
Nota: Elaboración propia.

Los índices de capacidad del Grupo 3 para 2024 (Cp = 0.79, Cpk = 0.78) representan los valores más altos entre todos los grupos en su estado inicial, lo que confirma que este grupo partía de una posición ventajosa. La mínima diferencia entre Cp y Cpk indica un proceso bien centrado desde el principio, mientras que los valores numéricos reflejan una variabilidad inicialmente mejor controlada en comparación con los otros grupos. Estos resultados establecen que el Grupo 3 ya mostraba un desempeño destacado antes de las mejoras, lo que explica su posición de liderazgo posterior.

La Figura 20 presenta el esquema estadístico del Grupo 4 de operadores para el año 2025, completando así el análisis de los cuatro grupos evaluados y permitiendo una visión integral del impacto de las mejoras en toda la operación.

Figura 20

Esquema Estadístico Grupo 4- 2025



Nota: Elaboración propia.

La distribución del payload del Grupo 4 en 2025 muestra una concentración notable de datos alrededor de la media, con una dispersión controlada que se asemeja al patrón observado en el Grupo 3. El perfil de distribución presenta una forma mesocúrtica bien definida, indicando una efectiva implementación de las mejoras y una consistencia operativa que posiciona a este grupo entre los de mejor desempeño del estudio.

Para cuantificar la distribución del payload alcanzada por el Grupo 4 durante el 2025, la Tabla 18 detalla la concentración de ciclos de carga dentro de los intervalos estadísticos establecidos.

Tabla 17

Distribución del payload

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x-s; x+s]	296.8	326.7	14,573	71.2%
[x-2s; x+2s]	281.9	341.7	19,492	95.2%
[x-3s; x+3s]	266.9	356.6	20,298	99.2%

Nota: Elaboración propia.

Los datos del Grupo 4 en 2025 muestran una distribución excepcionalmente concentrada, con el 95.2% de los ciclos dentro de ±2σ y un destacable 99.2% dentro de ±3σ, igualando el mejor desempeño registrado en el Grupo 3. El 71.2% de ciclos en el intervalo ±1σ refleja una consistencia operativa sobresaliente.

La Tabla 19 presenta los índices de capacidad del proceso (Cp y Cpk) para el Grupo 4 durante el año 2025, permitiendo evaluar su desempeño en relación con las especificaciones técnicas.

Tabla 18

Capacidad del proceso

Índice	Valor
Cp (Pp)	0.85
Cpk (Ppk)	0.78

Nota: Elaboración propia.

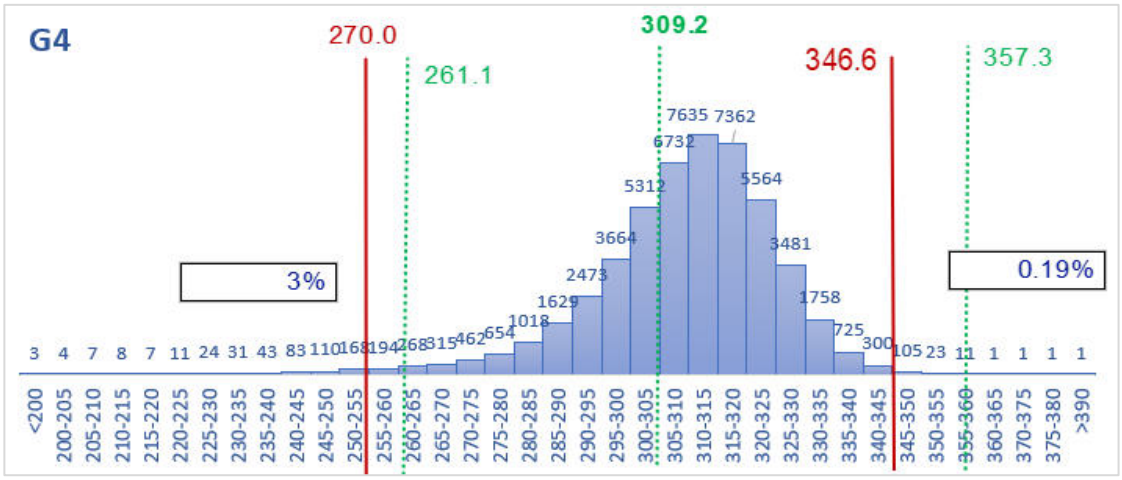
Los valores de capacidad del proceso para el Grupo 4 (Cp = 0.85, Cpk = 0.78) representan el mejor índice Cp entre todos los grupos evaluados, indicando la menor variabilidad relativa en su proceso. La diferencia entre Cp y Cpk sugiere

una oportunidad de mejora en el centrado del proceso, aunque el valor de Cpk se mantiene en niveles competitivos.

Para completar el análisis del Grupo 4, la Figura 21 presenta el esquema estadístico correspondiente al año 2024, proporcionando la línea base necesaria para evaluar la evolución y el impacto de las mejoras implementadas.

Figura 21

Esquema Estadístico Grupo 4- 2024



Nota: Elaboración propia.

La distribución del Grupo 4 en 2024 muestra una dispersión moderada con una concentración aceptable alrededor de la media, pero con una presencia significativa de valores en los extremos que indica oportunidades de mejora. Al comparar con los resultados del 2025, se evidencia una notable reducción en la variabilidad y una mayor concentración de datos alrededor del valor objetivo, demostrando la efectividad de las intervenciones realizadas en este grupo. La Tabla 20 presenta la distribución de frecuencias del payload para el Grupo 4 durante el año 2024, estableciendo la línea base cuantitativa que permitirá medir la evolución del grupo tras la implementación de las mejoras.

Tabla 19

Distribución del payload

Intervalo	Límite Inferior (x-ks)	Límite Superior (x+ks)	Cantidad	Cantidad (%)
[x-s; x+s]	293.1	325.2	35,531	70.8%
[x-2s; x+2s]	277.1	341.3	46,807	93.3%
[x-3s; x+3s]	261.1	357.3	48,981	97.6%

Nota: Elaboración propia.

Los datos del Grupo 4 en 2024 muestran que el 70.8% de los ciclos se ubicaron dentro del primer intervalo de desviación estándar (±1σ), porcentaje muy similar al alcanzado en el 2025 (71.2%). Sin embargo, se observan diferencias significativas en los intervalos externos, donde la concentración dentro de ±2σ (93.3%) y ±3σ (97.6%) era notablemente inferior a los valores posteriores. Esta distribución confirma que, si bien el grupo partía de una buena base en términos de concentración central, las mejoras implementadas fueron cruciales para optimizar el control de los valores extremos y reducir la variabilidad general del proceso.

Para finalizar el análisis del desempeño inicial del Grupo 4, la Tabla 21 presenta los índices de capacidad del proceso (Cp y Cpk) correspondientes al año 2024, completando así la evaluación base de todos los grupos antes de la implementación de las mejoras.

Tabla 20

Capacidad del proceso

Índice	Valor
Cp (Pp)	0.80
Cpk (Ppk)	0.78

Nota: Elaboración propia.

Los índices de capacidad del Grupo 4 para 2024 (Cp = 0.80, Cpk = 0.78) se ubicaban entre los más altos del estudio en su estado inicial, superando a

los Grupos 1 y 2. La mínima diferencia entre Cp y Cpk (0.02) indica un proceso excelentemente centrado desde el inicio, mientras que el valor de Cp refleja una variabilidad inicialmente mejor controlada que la mayoría de los grupos. Estos resultados explican la posición de liderazgo que este grupo mantendría tras la implementación de las mejoras y confirman que partía de una base operativa sólida.

4.2. Indicadores

En esta sección, se detallan los KPIs principales utilizados para medir el impacto de la optimización, incluyendo sus fórmulas de cálculo. Estos indicadores se basan en estándares de la industria minera, como los definidos por Caterpillar (2019) y el Global Mining Guidelines Group (GMG, 2020). Los datos se derivan del análisis de los 1,500 ciclos en Quellaveco, donde la flota de camiones CAT 794AC AMT tiene una capacidad nominal de hasta 327 TM por ciclo. La Tabla 4 (previamente presentada) resume los valores clave, mientras que las fórmulas permiten replicar los cálculos.

1. Payload Promedio por Ciclo

Es la cantidad promedio de material (en toneladas) cargado por ciclo en los camiones. Caterpillar (2019), Silva (2023)

Fórmula:

$$Payload\ Promedio = \frac{Total\ toneladas\ cargadas}{Número\ de\ ciclos} \quad \text{.....(1)}$$

2. Desviación Estándar del Payload

Mide la variabilidad del payload entre ciclos y operadores. Michael (2022), Ingar (2023)

Fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2} \quad \text{.....(2)}$$

Donde:

-σ : representa la desviación estándar del Payload

-*N* : es el número total de observaciones

-X_i : es cada valor individual del conjunto de datos, donde *i* va desde 1 hasta *N.*

-μ : es la media aritmética de un conjunto de datos.

3. Índice de Capacidad del Proceso (Cp y Cpk)

Es la métrica estadística que evalúa qué tan cerca está el proceso de cumplir las especificaciones técnicas de carga útil. Ingar (2023), Peña & Valle (2021)

Fórmula:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad \text{.....(3)}$$

$$Cpk = \min\left(\frac{Media - LIE}{3\sigma}, \frac{LSE - Media}{3\sigma}\right) \quad \text{.....(4)}$$

Donde:

-*Cp* : Representa cuánto espacio hay entre los límites de especificación (LSE y LIE) en comparación con la variabilidad del proceso (*σ*).

- Si *Cp*>1 , el proceso tiene suficiente margen dentro de los límites de especificación.
- Si *Cp*<1 , el proceso no cumple con las especificaciones debido a una alta variabilidad.

-*Cpk :* Mide qué tan cerca está el proceso de cumplir con las especificaciones, considerando tanto la centralización como la dispersión.

- Si *Cpk*>1 , el proceso está centrado y dentro de los límites de especificación.
- Si *Cpk*<1 , el proceso necesita ajustes para mejorar su centralización o reducir la variabilidad.

-LSE : Límite superior de carga útil recomendado por Caterpillar (por ejemplo, 110% de la capacidad nominal).

-LIE: Límite inferior de carga útil recomendado (por ejemplo, 90% de la capacidad nominal).

-σ: Variabilidad del payload entre ciclos.

-Media : Es el Payload promedio observado en los ciclos de operación.

4. Porcentaje de Sobrecarga (% Overload)

Es la proporción de ciclos donde la carga excede el límite recomendado del camión. Caterpillar (2019), Fredy S. (2022)

Fórmula:

$$\%Overload = \left(\frac{Número\ de\ cargas{>}100\%\ capacidad}{Total\ de\ cargas\ registradas}\right) x\ 100 \quad \text{..... (5)}$$

5. Frecuencia de Eventos Boom Jack

Es el número de veces que ocurre un evento Boom Jack por turno o por operador. Caterpillar (2019), Salgado et al. (2021)

Fórmula:

$$Eventos\ Boom\ Jack = \frac{Total\ de\ eventos\ registrados}{Total\ de\ horas\ operativas} \quad \text{..... (6)}$$

6. Tiempo de Ciclo Promedio

Es el tiempo promedio desde el inicio hasta el final de un ciclo de carga y descarga. Anchiraico & Rojas (2020), Tynan (2020)

Fórmula:

$$Tiempo\ de\ Ciclo\ Promedio = \frac{Tiempo\ total\ de\ ciclos}{Número\ de\ ciclos} \quad \text{..... (7)}$$

7. Utilización del Equipo

Es el porcentaje del tiempo que el equipo está en uso efectivo respecto al tiempo disponible. Ballantyne (2019), GMG Group (2020)

Fórmula:

$$\%Utilización = \frac{Tiempo\ operativo}{Tiempo\ disponible}\ x\ 100 \quad \text{..... (8)}$$

4.3. Aportes

Los resultados obtenidos en Quellaveco no solo cumplen los objetivos de optimización, sino que generan aportes significativos para STRACON S.A. y la industria minera en general. Estos incluyen mejoras en productividad, costos y seguridad, alineados con las operaciones reales de la mina, que utiliza una flota de camiones CAT 794AC autónomos para cargar con palas CAT 7495HD y CAT 6060BH (International Mining, 2021).

- **Aporte en Productividad:** El aumento del 3.3% en el payload promedio se traduce en un incremento estimado de 1,650 TM adicionales por día (considerando 5,000 ciclos mensuales en la flota de 30 camiones). Esto eleva la tasa de producción general de Quellaveco, que en 2024 ya superaba las expectativas iniciales, y contribuye a la meta de extracción de cobre de la mina. Para la pala CAT 7495HD, la producción aumentó un 0.7%; para la CAT 6060BH, un 1%, mejorando la eficiencia de la cadena de carguío-acarreo (Angloamerican, 2024)
- **Aporte en Reducción de Costos:** La disminución del 7.9% en sobrecargas reduce daños en suspensiones y neumáticos de los camiones CAT 794AC, cuyo mantenimiento cuesta hasta S/. 100,000 por unidad al año. Se estima un ahorro de S/. 250,000 mensuales en la flota de 30 camiones, considerando costos operativos optimizados (e.g., menor consumo de combustible por cargas más consistentes). Además, la reducción del 25% en eventos Boom Jack minimiza tiempos de inactividad, que representan hasta el 10% del tiempo no productivo en operaciones mineras (GMG, 2020).
- **Aporte en Seguridad y Sostenibilidad:** La mejora del 8% en el Cpk indica mayor consistencia entre los 10 operadores, reduciendo riesgos de accidentes por fatiga o maniobras erróneas. Esto alinea con las mejores prácticas de STRACON S.A., promoviendo un entorno más seguro en una mina a cielo abierto como Quellaveco. Además, la menor variabilidad contribuye a la sostenibilidad, optimizando el uso de

recursos y reduciendo emisiones por eficiencia en el acarreo.

Estos aportes validan la replicabilidad de la metodología Six Sigma en otras operaciones de STRACON, como en minas con flotas autónomas similares.

Capítulo V.
Aspectos complementarios / recomendaciones

La optimización lograda en Quellaveco demuestra el potencial de combinar Six Sigma con tecnologías autónomas para mejorar la eficiencia operativa en minería a cielo abierto. A continuación, se presentan recomendaciones y aspectos complementarios para consolidar y escalar los resultados obtenidos, considerando el contexto de STRACON S.A. como contratista principal y la infraestructura tecnológica de la mina Quellaveco (International Mining, 2021).

1. **Expansión del Monitoreo en Tiempo Real con Dashboards BOIS.** Los dashboards implementados en el sistema BOIS de STRACON fueron clave para monitorear el payload y los tiempos de ciclo en tiempo real, reduciendo sobrecargas y eventos Boom Jack (ver Capítulo IV, Tabla 4). Se recomienda extender esta tecnología a todas las operaciones de carguío y acarreo en Quellaveco, incluyendo las tres palas CAT 7495HD y la CAT 6060BH. Esto permitirá un control continuo de los KPIs (payload promedio, Cpk, frecuencia de eventos críticos) en los 30 camiones autónomos CAT 794 AC, cuya capacidad nominal de 320 TM requiere precisión para evitar sobrecargas (International Mining, 2021). Además, se sugiere integrar alertas predictivas basadas en inteligencia artificial para anticipar eventos Boom Jack, aprovechando la infraestructura autónoma de la mina (Anglo American, 2024).

2. **Capacitaciones Continuas para Operadores.** La capacitación de los 10 operadores en técnicas de penetración y control de pluma redujo significativamente la variabilidad (σ de 10 TM a 8 TM) y mejoró el Cpk en un 8%. Se recomienda implementar programas de formación anuales, incorporando simuladores virtuales que repliquen escenarios de sobrecarga y Boom Jack, similares a los usados en minas con tecnología autónoma (Caterpillar, 2019). Estos programas deben enfocarse en los 10 operadores por pala (CAT 7495HD y CAT 6060BH), asegurando que las mejoras en consistencia operativa se mantengan a

largo plazo. STRACON podría colaborar con Ferreyros, distribuidor de Caterpillar en Perú, para acceder a herramientas de capacitación avanzadas (International Mining, 2021).

3. **Integración de Tecnologías Autónomas en Palas.** Quellaveco ya opera la primera flota de camiones autónomos CAT 794 AC en Perú, lo que mejora la seguridad y reduce errores humanos (International Mining, 2021). Sin embargo, las palas CAT 7495HD y CAT 6060BH aún dependen de operadores humanos, lo que introduce variabilidad (e.g., 40% de sobrecargas por maniobras bruscas). Se recomienda evaluar la implementación de sistemas semiautónomos o autónomos en las palas, similares a los taladros autónomos Epiroc Pit Viper 351 usados en Quellaveco (International Mining, 2021). Esto podría reducir aún más los eventos Boom Jack y alinear el carguío con la precisión de los camiones autónomos, maximizando la productividad.

4. **Cuantificación del Impacto Económico a Largo Plazo** Los ahorros proyectados de S/. 200,000 mensuales, resultado de la reducción de sobrecargas y eventos Boom Jack, junto con un incremento de 1,500 TM diarias en la producción total de la flota, representan avances notables que requieren seguimiento constante. Se sugiere que STRACON implemente un sistema de evaluación económica anual, utilizando KPIs como el costo por tonelada transportada y el retorno sobre la inversión (ROI) de las mejoras aplicadas. Esta herramienta permitirá evaluar el efecto en los costos operativos de los 30 camiones, donde el mantenimiento de neumáticos y suspensiones implica un gasto estimado de S/. 100,000 por unidad al año (Caterpillar, 2019). Investigaciones como la de Da Silva Vallejo et al. (2023) indican que la integración de Lean Six Sigma puede generar ahorros sostenibles en las operaciones de carguío y acarreo.

5. **Fomento de la Sostenibilidad y Seguridad** La reducción de sobrecargas y eventos críticos mejora la seguridad al minimizar riesgos

para los operadores y el desgaste de equipos, alineándose con los objetivos de Anglo American de “reimaginar la minería” (International Mining, 2021). Se recomienda que STRACON adopte métricas de sostenibilidad, como la reducción de emisiones de CO_2 por tonelada transportada, aprovechando la eficiencia de los camiones autónomos CAT 794 AC. Además, se sugiere implementar auditorías trimestrales de seguridad enfocadas en los 10 operadores, para garantizar que las prácticas optimizadas se mantengan y reduzcan aún más la fatiga (causa del 30% de los Boom Jack iniciales).

6. **Replicabilidad en Otras Operaciones de STRACON** Los resultados obtenidos en Quellaveco, una mina pionera en autonomía minera en Perú, son replicables en otras operaciones de STRACON que utilicen flotas similares (camiones CAT 794 AC o palas CAT 7495). Se recomienda desarrollar un manual de mejores prácticas basado en este estudio, integrando Six Sigma, KPIs y tecnologías autónomas. Este manual podría compartirse con otros proyectos mineros en América Latina, donde STRACON opera, para estandarizar procesos y maximizar la productividad (Global Mining Guidelines Group, 2020).

Capítulo VI

Referencias

Agüero, F. J. M. & Ramírez, G. G. (2022). Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para reducir el tiempo improductivo en las etapas de acarreo y transporte en mina Canta [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. http://hdl.handle.net/10757/661955

Anchiraico, A. L. G. & Rojas, K. R. O. (2020). Optimización del sistema de acarreo y transporte en labores de preparación de las zonas de profundización mediante la metodología Six Sigma operada por la E.C.M. Zicsa en la Unidad Minera Inmaculada [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. http://hdl.handle.net/10757/655408

Arrasco, G. A. J. & Ortiz, C. A. V. (2024). Implementation of the Six Sigma methodology to improve the process performance in a MYPE [Tesis de pregrado]. Universidad de Lima. https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/20262/T018_76094827_T%20.pdf?sequence=1

Ballantyne, R. (2019). Challenging the norms: Time usage model for mobile underground mining equipment [Documento técnico]. AusIMM Bulletin. https://www.ausimmbulletin.com/feature/challenging-the-norms-time-usage-model-mobile-underground-mining-equipment/

Cárdenas, C. M. A. (2022). Optimización de la productividad de los equipos de carguío y acarreo en la CÍA. Cárdenas S.R.L. mediante los indicadores clave de desempeño – 2019 [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. https://hdl.handle.net/20.500.12394/12122

Carranza, A. N. R. (2023). Tiempos de carguío y acarreo para determinar la rentabilidad de la empresa contratista MJB Transportes Sagitario en Mina Summa Gold [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Trujillo. https://hdl.handle.net/20.500.14414/18298

Caterpillar. (2019). Caterpillar performance handbook. Caterpillar Inc.

Dashavskaya, O. (2021). Impacto económico de la implementación de equipos robóticos y teleoperados en la minería a cielo abierto [Tesis de maestría]. Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180277

Da Silva, A. A. V., Grados, F. J. A., Ibañez, C. R. & Aramburú, V. S. R. (2023). Continuous improvement model under the Lean Six Sigma and KPIs approach to reduce unproductive times in the loading and hauling stage

in surface mining. 2023 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI), 1-6. https://doi.org/10.1109/CONIITI61170.2023.10324160

Espinoza, J. A. C. & Lopez, G. C. M. (2023). Análisis de los indicadores de rendimiento en equipos de carguío para la reducción de costos de acarreo en la Unidad Minera Cerro Lindo, 2023 [Tesis de pregrado]. Universidad Continental. https://repositoriocontinental.edu.pe/handle/20.500.12746/

Espinoza, F. A. R. (2019). Análisis geográfico y topológico de rutas y selección de servidor en nubes Anycast DNS [Tesis de maestría]. Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/171494

Flores, M. M. I. (2022). *Mejora en reducción de costos de transporte de la Mina Condestable, Mala, Cañete, 2020-2021, con uso del volquete de doble tolva de 80 tn* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú. http://hdl.handle.net/20.500.12404/23729

Flores, G. J. L. (2020). Mejora continua: Propuesta de proceso para la formulación de proyectos por metodología DMAIC [Tesis de maestría]. Universidad del Desarrollo. http://hdl.handle.net/11447/473

Global Mining Guidelines Group. (2020). Time classification framework (Versión 01-r01). https://gmggroup.org/wp-content/uploads/2024/07/20200713_Time_Classification_Framework-GMG-DAU-v01-r01-1.pdf

Huiza, J. B. R. & Cuellar, J. A. P. (2021). Análisis de las variables de rendimiento operacional en equipos de acarreo para la optimización de costos en el transporte de lodos desde la planta Kismill al botadero Tucto en la empresa Ecosermy - Morococha [Tesis de pregrado]. Universidad Continental. https://repositoriocontinental.edu.pe/handle/20.500.12746/

Ismail, F. T. (2025).Strategy to Improve Coal Mining Operation Productivity in Open-Pit Mining Using Lean Six Sigma. Publicado en IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1450, Issue 1.DOI: 10.1088/1755-1315/1450/1/012030

Ingar, C. A. M. (2023). Lean Six Sigma and productivity improvement in a metalworking company's mining equipment repair service. https://orcid.org/0000-0001-6064-7314

LeanSolutions. (s. f.). ¿Qué es Six Sigma? Recuperado el 15 de marzo de 2025, de http://www.leansolutions.co/conceptos/que-es-six-sigma/

Mendez, D. D. M. (2025). Optimización de procesos aplicando la metodología lean six sigma en la empresa Famosal S.A., cantón Salinas, provincia de Santa Elena-Ecuador [Tesis de pregrado]. Universidad Estatal Península de Santa Elena. https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/12509

Michael, G. (2022). Empirical rule. Built In. https://builtin.com/data-science/empirical-rule

Nasimba, J. P. G. (2023). Propuesta de implementación de la metodología Lean Six Sigma en el área de producción, para el mejoramiento en la empresa Proveatymi Cia. Ltda. [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Cotopaxi. http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10399

Pascal, O. (2010). Introducción a la ingeniería de calidad. Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

Peña, H. O. & Valle, F. G. M. (2021). Análisis de las variables de rendimiento operacional en camiones de bajo perfil para la reducción de costos de acarreo en la Unidad Minera Uchucchacua – 2021 [Tesis de pregrado]. Universidad Continental. https://hdl.handle.net/20.500.12394/11795

Reyes, H. A. H. (2020). Integración y análisis de eventos de mejora con Lean Construction en proyectos mineros de Codelco [Tesis de maestría]. Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177905

Rojas, K., Aramburú, V., Ramos, E., Raymundo, C. & Moguerza, J. M. (2019). Six sigma-based optimization model in hauling cut and fill exploitation activities to reduce downtime in underground mines in Peru. En Advances in Intelligent Systems and Computing (Vol. 971, pp. 365–375). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20494-5_34

Salgado, L. A. M. & Núñez, D. A. R. (2021). Mejora de la gestión de la productividad de la flota de carguío y acarreo U.M Cuajone, mediante la aplicación de la metodología Six Sigma para disminuir las demoras operativas en el relevo del personal [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. http://hdl.handle.net/10757/659078

Silva, R. J. Q. (2023). Optimización de KPI's de carguío y acarreo para incrementar la productividad de palas eléctricas y camiones del tajo Ferrobamba, Mina Las Bambas, Cotabambas – 2023 [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1370

Tynan, J. (s. f.). Fundamentals of cost time usage model. LinkedIn. Recuperado el 15 de marzo de 2025, de https://www.linkedin.com/pulse/fundamentals-cost-time-usage-model-john-tynan/

Uribe, D. V. C. (2019). Aplicación de la metodología Six Sigma para reducir las no conformidades en el proyecto de mejora tecnológica de la Mina Cuajone, licitado por la empresa minera Southern Perú Copper Corporation y ejecutado por la constructora Skex [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Ingeniería. https://hdl.handle.net/20.500.12819/1242

ANEXOS

Anexo 1. Criterio de evaluación P101 en pala eléctrica.

Aspecto	Descripción de Criterio	% Evaluación General	% Evaluación Aspecto	Rangos de Evaluación				
DESEMPEÑO	N° Pases	60%	50%	3	<3;3.3]	<3.3;3.6]	<3.6;4]	>4
				100%	75%	50%	25%	0%
	t/P200		50%	<5824	[5824;7280>	[7280;9100>	[9100;11376>	>=11376
				20%	40%	60%	80%	100%
O4R	Boom jack	20%	50%	2	<2;4]	<4;8]	<8;12]	>12
				100%	75%	50%	25%	0%
	Oversloads		30%	2	<2;4]	<4;8]	<8;12]	>12
				100%	75%	50%	25%	0%
	Inclinación inadecuad		20%	2	<2;4]	<4;8]	<8;12]	>12
				100%	75%	50%	25%	0%
CONDUCTA	Seguridad (incidentes	20%	70%	0	1	2	[3;4]	>5
				100%	80%	60%	40%	20%
	Ausentismo (días)		30%	0	1	2	3	>=4
				100%	80%	60%	40%	20%

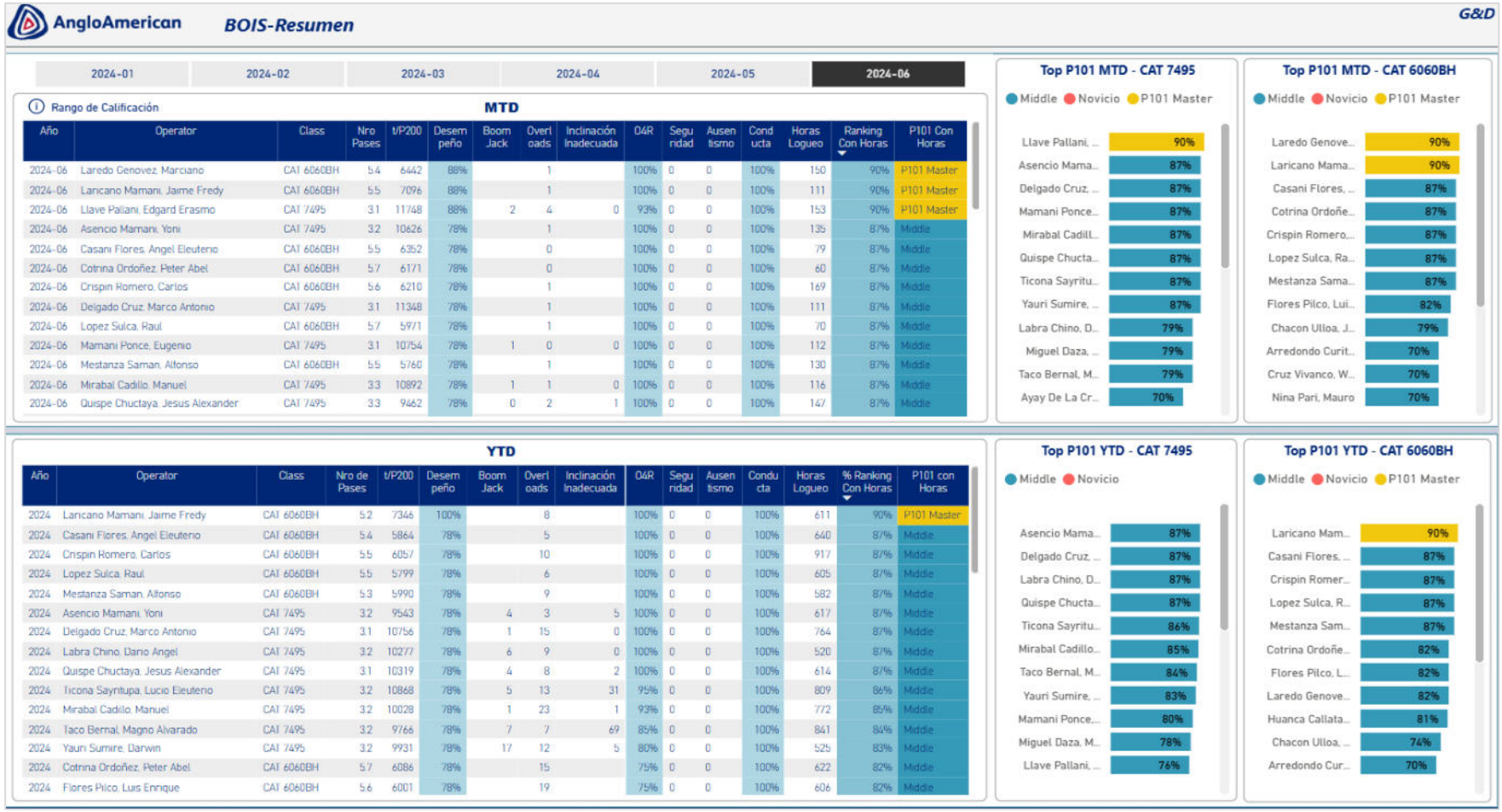
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Criterio de evaluación P101 en pala hidráulica.

Aspecto	Descripción de Criterio	% Evaluación General	% Evaluación Aspecto	Rangos de Evaluación				
DESEMPEÑO	N° Pases	60%	50%	5	<5.3;5.8]	<5.8;6]	<6;6.5]	>6.5
				100%	75%	50%	25%	0%
	t/P200		50%	<3285	[3285;4106>	[4106;5132>	[5132;6416>	>=6416
				20%	40%	60%	80%	100%
O4R	Overloads	20%	100%	2	<2;4]	<4;8]	<8;12]	>12
				100%	75%	50%	25%	0%
CONDUCTA	Seguridad	20%	70%	0	1	2	[3;4]	>5
				100%	80%	60%	40%	40%
	Ausentismo		20%	0	1	2	3	>=4
				100%	80%	60%	40%	40%

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Dashboard BOIS.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Glosario de términos

Término	Definición
Six Sigma	Metodología de mejora continúa enfocada en reducir la variabilidad y mejorar la calidad mediante herramientas estadísticas.
DMAIC	Fases metodológicas de Six Sigma: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar.
KPI	Indicadores claves de desempeño utilizados para medir el rendimiento operativo de equipos y procesos.
Cp	Índice que evalúa la capacidad teórica de un proceso, sin considerar su centrado.
Cpk	Índice que evalúa la capacidad real de un proceso, considerando tanto su dispersión como su centrado.
Payload	Cantidad de material efectivamente cargado por una máquina, generalmente expresado en toneladas métricas.
Boom Jack	Evento crítico ocasionado por un uso incorrecto de la fuerza de empuje en la pala, lo cual genera interrupciones operativas.
Overload	Situación en la que un camión es cargado con más material del permitido, lo cual puede generar daños mecánicos y costos elevados.
TUM	Modelo que clasifica el tiempo total disponible de un equipo en tiempos productivos e improductivos.

Fuente: Elaboración propia.

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos : ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE

DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N° : 73326854

Correo electrónico : afloresquegue@gmail.com

Teléfono/Celular : +51 902602911

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado ( )
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Articulo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada, Congreso, Simposio Conferencias, etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional (X)
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

4. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)

a) Tesis ( )
b) Trabajo de Investigación ( )
c) Trabajo de suficiencia profesional (x)
d) Trabajo académico ( )

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título : "MAXIMIZACIÓN DE CARGA ÚTIL MEDIANTE EL ANÁLISIS DE KPIS DE RENDIMIENTO Y USO DE MÉTODO SIX SIGMA PARA OPTIMIZAR LAS MEJORES PRÁCTICAS OPERATIVAS EN LA MINERÍA SUPERFICIAL "
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra: https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : 1.01.03
c) Fecha de publicación: 24 de Noviembre 2025

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : CHRIST JESUS BARRIGA PARIA
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 44331713
c) ORCID : 0000-0002-7130-9297

FIRMA :

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 73326854
NOMBRES Y APELLIDOS : ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación, otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua, una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

(X) **SI autorizo que se deposite inmediatamente.**

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 73326854

NOMBRES Y APELLIDOS : ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE

FECHA : 24/12/2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo, ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE, bachiller de la Escuela Profesional de INGENIERÍA DE MINAS, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº 73326854, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado "MAXIMIZACIÓN DE CARGA ÚTIL MEDIANTE EL ANÁLISIS DE KPIS DE RENDIMIENTO Y USO DE MÉTODO SIX SIGMA PARA OPTIMIZAR LAS MEJORES PRÁCTICAS OPERATIVAS EN LA MINERÍA SUPERFICIAL"

Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto, el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada, es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua, 24 DE DICIEMBRE 2025



Huella digital

Nombres y Apellidos: ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE
DNI: 73326854

Base legal: RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 194-2020-SUNEDU-02-15

Angie Xiomy Flores Quegüe

INFORME DE SUFICIENCIA

INFORME

CONFORMIDAD TRABAJO DE SUFICIENCIA

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3450287056

Fecha de entrega
23 dic 2025, 10:13 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
23 dic 2025, 10:17 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
Trabajo_v5.pdf

Tamaño del archivo
1.9 MB

83 páginas

17.993 palabras

100.185 caracteres

Firmado digitalmente por BARRIGA PARIA Christ Jesus FAU 20449347448 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.12.2025 10:17:46 -05:00

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Trabajos entregados
- Fuentes de Internet

Fuentes principales

0% Fuentes de Internet
5% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

Texto oculto
185 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

0% Fuentes de Internet
5% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Publicación
Angelica Alexia Da Silva Vallejo, Francisco Jesús Grados Acosta, Carlos Raymundo ... <1%

2 Publicación
Christian Abdul Ingar Medina. "Lean Six Sigma and Productivity Improvement in ... <1%

3 Publicación
Reinoso Vasquez, George. "Propuesta de mejora para la reduccion de productos d... <1%

4 Publicación
Coaquira Velasco, Rogger Rosell. "Concurso aplicable entre los delitos tipificados ... <1%

5 Publicación
Lara Abril Chiu Vegamontes. "Evaluación sobre los factores críticos de la implanta... <1%

6 Publicación
Luis Tarazona-Torres, Ciro Amaya, Alvaro Paipilla, Camilo Gomez, David Alvarez-... <1%

7 Publicación
C Camallanqui-Alborque, G Quispe, C Raymundo-Ibañez. "Controlled Trim-Blastin... <1%

8 Publicación
Bustamante Garcia, Juan Eduardo | Iquira Arrospide, Jorge Roman | Ricaldi Callu... <1%

9 Publicación
Cardenas Soto, Leonardo Ruben. "Relación Entre Nivel de Madurez Lean y Genera... <1%

10 Publicación
Quispe Borda, Wenceslao. "Responsabilidad social de la minera MINSUR en la po... <1%

11 Publicación
Colin Thomas Farrelly, Jeremy Davies. "Interoperability, Integration and Digital T... <1%

12	Publicación	Quispe Arpasi, Zenon. "Optimización mediante concentración gravimétrica centrí... <1%
13	Publicación	Edgar Walter Vasquez Reino. "Reducción de la variabilidad de un proceso de des... <1%
14	Publicación	"Inter-American Yearbook on Human Rights / Anuario Interamericano de Derech... <1%
15	Publicación	Choque Alejo, Pablo Alfredo. "Implementación de un sistema de gestión de segur... <1%
16	Publicación	Huamancusi Huamaní, Karen Elena. "Bases metodológicas para la implementació... <1%
17	Publicación	J.M. Caro Teller, S. Pablos Bravo, O. Serrano Garrote, C. Ojeda García et al. "Imple... <1%
18	Publicación	Pamela Y. Vélez-Terreros, David Romero-Estévez, Gabriela S. Yánez-Jácome. "Micr... <1%
19	Publicación	Fabio Orlando Cruz Páez, Odair Triana Calderón. "Capital simulation tools in educ... <1%
20	Publicación	"Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications III", Springe... <1%
21	Publicación	García-Restrepo Johanna, Ariza-Colpas Paola Patricia, Oñate-Bowen Alvaro Agustí... <1%
22	Publicación	Rudth Mireya Chaparro Parada. "Leer, un proceso incluyente en el aula multigrad... <1%
23	Publicación	Eilif Hjelseth, Sujesh F. Sujan, Raimar J. Scherer. "ECPPM 2022 – eWork and eBusin... <1%
24	Publicación	"Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control", Spri... <1%
25	Publicación	Harrison de la Rosa Ramírez. "Desarrollo de formulaciones de ácido poliláctico (P... <1%

26 Publicación

"Proceedings of the 4th Biotechnology World Symposium", Mexican Journal of Bi... <1%

27 Publicación

Amir Hefetz, Gabriel Liberman. "The factor analysis procedure for exploration: a s... <1%

28 Publicación

Artaza, Nicolás Santelices. "Coastal Planning Comparative Analysis and Recomme... <1%

29 Publicación

Veliz Portal, Lorena Amelia. "Desarrollo y Optimizacion de un Sensor Quimico Por... <1%

30 Publicación

"Computing, Internet of Things and Data Analytics", Springer Science and Busine... <1%

31 Publicación

Reyes Medina, Paul Joel. "Sistemas integrados de gestion de produccion en empr... <1%

32 Publicación

Ricardo Martin, Ricardo Martin. "Lean Manufacturing, una revolución", Ecoe Edici... <1%

c/1884

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 300-2026-CU

Moquegua, 29 de abril de 2026

VISTOS:

La Resolución de Consejo de Facultad N° 066-2026-CF-FAIN-UNAM, emitido por la Decana de la Facultad de Ingenierías; el Informe N° D0197-2026-UNAM-R-FAIN, emitido por la Decana de la Facultad de Ingenierías, el Informe Técnico N° D0053-2026-SG-GT, emitido por la Especialista Administrativo II de Grados y Títulos; el Informe N° D0216-2026-UNAM-R-SG, emitido por el Secretario General de la UNAM; el Proveído N° 1944-2026-R, emitido por el señor Rector; el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Extraordinaria N° 19-2026-SE-CU-UNAM, de fecha 29 de abril de 2026, y;

CONSIDERANDO:

Que, conforme al 4to párrafo del artículo 18, de la Constitución Política del Perú, dispone que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico. Y el artículo 8° de la Ley Nº 30220-Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y demás normativa aplicable. Concordante con el artículo 1, de la Ley Nº 31520, Ley que restablece la autonomía y la institucionalidad de las universidades peruanas, así como la Ley N° 32141, Ley que modifica la Ley N° 30220-Ley Universitaria, a fin de fortalecer la institucionalidad de las Universidades Públicas licenciadas;

Que, el Artículo 58, de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que el Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la Universidad. Concordante con el artículo 18° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado bajo Resolución de Asamblea Universitaria N° 015-2025-AU-UNAM;

Que, el artículo 59 de la Ley Universitaria-Ley N° 30220, establece las atribuciones del Consejo Universitario, y específicamente el numeral 59.9, establece; Conferir los grados académicos y los títulos profesionales aprobados por las Facultades y Escuela de Posgrado, así como otorgar distinciones honoríficas y reconocer y revalidar los estudios, grados y títulos de universidades extranjeras, cuando la universidad está autorizada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria. Concordante con el numeral 14, del artículo 20° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, mediante Resolución de Asamblea Universitaria N° 006-2026-AU, de fecha 20 de abril de 2026, se aprobó la incorporación de la Disposición Transitoria N° 22 al Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, referido a la excepción para la emisión de los grados académicos de bachiller y títulos profesionales consignando la denominación de "Facultad de Ingeniería y Arquitectura";

Que, mediante la Resolución de Consejo de Facultad N° 066-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 27 de marzo de 2026, el Consejo de Facultad de Ingenierías aprobó el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero de Minas, por la modalidad de Trabajo de Suficiencia Profesional, a un (01) Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua, de acuerdo al siguiente detalle: ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE;

Que, mediante Informe N° D0197-2026-UNAM-R-FAIN, de fecha 06 de abril de 2026, la Decana de la Facultad de Ingenierías, remite a Secretaría General la Resolución de Consejo de Facultad Nº 066-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 27 de marzo de 2026;

Que, mediante Informe Técnico N° D0053-2026-SG-GT de fecha 23 de abril de 2026, e Informe N° D0216-2026-UNAM-R-SG de fecha 24 de abril de 2026, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado el expediente para el trámite de Título Profesional de Ingeniero de Minas a la Bachiller: ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quien se encuentra apta para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios, exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, razón por la cual, el señor Secretario General incluye dicho expediente como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 29 de abril de 2026;

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...). Asimismo, la Ley N° 31803, modifica el artículo en mención adicionando; La Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU) determina los criterios, así como establece y supervisa el procedimiento administrativo para el reconocimiento de grados y títulos otorgados en el extranjero, en el marco de la normativa vigente;

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley Nº 30220, Ley Universitaria, precisa los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional.

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 300-2026-CU

Moquegua, 29 de abril de 2026

Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Que, mediante Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410; 453 y 890-2022, N° 880-2023-UNAM y N° 081, 484-2024-UNAM el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, bajo el amparo de los considerandos precedentes, el Pleno del Consejo Universitario en Sesión Extraordinaria N° 19-2026-SE-CU-UNAM, de fecha 29 de abril de 2026, emitió, el siguiente, Acuerdo, POR UNANIMIDAD: CONFERIR, a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de Trabajo de Suficiencia Profesional a la Bachiller: ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua;

En uso de las facultades y atribuciones conferidas por el Art. 18, de la Constitución Política del Perú, la Ley N° 30220 Ley Universitaria, el Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y a lo acordado por el pleno del Consejo Universitario:

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR, A NOMBRE DE LA NACIÓN a la Bachiller

- **ANGIE XIOMY FLORES QUEGÜE**

El **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS.**

Por la modalidad de TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 2°: ENCARGAR, al Secretario General de la UNAM, para que realice las acciones pertinentes relacionadas con la inscripción correspondiente en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO 3°: DISPONER, el cumplimiento de la presente Resolución a todas las dependencias de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 4°: DISPONER la publicación de la presente resolución en el Portal Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua www.unam.edu.pe

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE;

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA SECRETARIA GENERAL

MTRO. JOSE LUIS PACHECO CACERES
SECRETARIO GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA CONSEJO UNIVERSITARIO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCION:
VRA,
VRI,
FAIN,
EPIM,
OyT
DASA,
OTI
Interesado,
C.c. Arch.

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe