

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica




TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Implementación de la metodología Lean Six Sigma para el
cumplimiento de las metas de producción en minería**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas


Elaborado por

Rubén Rolando Pineda Estrada

 0009-0000-3050-6983

Asesor

MBA. Henry Mamfredo Zambrana Flores

 0000-0001-9019-191X

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Pineda Estrada [1]
Referencia/Reference	[1] R. Pineda Estrada, " <i>Implementación de la metodología Lean Six Sigma para el cumplimiento de las metas de producción en minería</i> ". [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Pineda, 2023)
Referencia/Reference	Pineda, R. (2023). <i>Implementación de la metodología Lean Six Sigma para el cumplimiento de las metas de producción en minería</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*Dedico este trabajo a mi esposa Milagros
y a mi hija Mayra, mis motores para
seguir esforzándome y superándome día a día.*

Agradecimiento

A Dios que me dio la vida y la energía y quien solo merece la honra de todos.

A mis colegas y amigos con quienes he podido trabajar e intercambiar ideas a través de todos los años de trabajo en minería.

Al Alma Mater, docentes y compañeros que me enseñaron y me dieron las herramientas para poder desarrollarme como profesional.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar, como la implementación de la metodología Lean Six Sigma; contribuyó al logro de los objetivos de producción de la Ampliación Mina Marcona o Nuevo Sistema de Chancado y Transferencia. Se hace mención a los problemas operativos que se encontraron, y el camino efectuado para lograr mejoras operacionales que permitieron cumplir esta meta.

Se intenta demostrar que, aplicando una metodología reconocida de gestión, en este caso, Lean Six sigma; se pueden lograr mejoras sustanciales que incidan en la producción, productividad y menores costos, permitiéndonos ver que herramientas podemos usar y si estas son realmente útiles para mejorar nuestros procesos, intentamos demostrar que la gestión de las limitantes de la productividad, permiten incrementos significativos de los indicadores de producción en una mina o planta. Anteriormente se han realizado trabajos usando la metodología en reducción de costos, incrementos de productividad en minería enfocados en tiempos muertos de operación, malas prácticas operativas, mejoras en planificación de minas y en mantenimiento minero. La teoría enseña que en toda actividad productiva o de servicios, existen oportunidades de mejora relacionadas a identificar y eliminar o reducir pérdidas, también se trabaja permitiéndose cierta variabilidad, siendo posible encontrar sobrecarga de los sistemas de producción. Habiéndose revisado la teoría Lean Six Sigma, se encontró que su aplicación a la realidad de la operación de Marcona nos permitía lograr mejoras significativas.

Palabras clave — Lean Six Sigma, limitantes de la producción, sobrecarga, variabilidad, pérdidas, implementación.

Abstract

The objective of this work is to show how the implementation of the Lean Six Sigma methodology contributed to the achievement of the production objectives of the Marcona Mine Expansion or New Crushing and Transfer System. Mention is made of the operational problems that were encountered and the path taken to achieve operational improvements that allowed meeting this goal.

We try to demonstrate that by applying a recognized management methodology, in this case Lean Six Sigma, we can achieve substantial improvements that affect production, productivity and lower costs, allowing us to see what tools we can use and if these are really useful to improve our processes, we try to demonstrate that the management of productivity constraints, allow significant increases in production indicators in a mine or plant. Previous work has been done using the methodology in cost reduction, productivity increases in mining focused on operating downtime, poor operating practices, improvements in mine planning and mine maintenance. The theory teaches us that in any production or service activity there are opportunities for improvement related to identify and eliminate or reduce waste, also work is done allowing some variability and thus it is also possible to find overloading of production systems. Having reviewed the Lean Six Sigma theory, it was found that its application to the reality of the Marcona operation allowed us the opportunity to implement it, and thus achieve significant improvements focusing on the three productivity constraints.

Keywords — Lean Six Sigma, production constraints, overload, variability, losses, implementation.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del Trabajo.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2.1 Problemática de la industria minera	1
1.2.2 Problema general.....	4
1.3 Objetivos del Estudio	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis general de estudio	4
1.4.1 Variable independiente.....	4
1.4.2 Variable dependiente	4
1.5 Antecedentes investigativos	4
1.5.1 Antecedentes Locales	4
1.5.2 Antecedentes Internacionales	7
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	10
2.1 Marco teórico	10
2.1.1 Historia de las implementaciones de mejora de procesos	10
2.1.2 Herramientas Lean Six Sigma.....	11
2.2. Marco conceptual.....	14
2.3 Operación mina y planta de hierro	15
2.3.1 Operación mina.....	15
2.4.2. Operación planta.....	18
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	26

3.1	Recolección de datos	26
3.1.1	Recolección de datos para analizar la sobrecarga	26
3.1.2.	Recolección de datos para analizar la variabilidad	29
3.1.3.	Recolección de datos para analizar la reducción y / o eliminación de pérdidas .	31
3.1.4	Población y muestra.....	33
3.1.5	Unidad de análisis.....	35
3.1.6.	Estrategia para la prueba de hipótesis	35
3.2	Procesamiento de la información.	37
3.2.1.	Análisis estadístico descriptivo.....	37
3.2.2.	Análisis de atípicos	45
3.2.3.	Análisis de correlación	47
3.2.4.	Análisis de dispersión entre variables	48
3.2.5.	Comprobación de normalidad de todas las variables	48
3.2.6.	Comprobación de linealidad entre variables.....	53
3.2.7.	Homocedasticidad de las varianzas de datos agrupados	54
3.2.8	Relación entre variables independientes.....	54
3.3	Obtención de resultados	55
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		59
4.1	Implementación de Lean Six Sigma	59
4.1.1	Desarrollo de la implementación	59
4.2.	Análisis de resultados	67
4.2.1	Análisis de validez interna.....	67
4.2.2.	Análisis de validez externa.....	69
4.3	Prueba de hipótesis	71
4.4	Discusión de resultados	75
4.5	Nuevas líneas de investigación.....	75
Conclusiones		77
Recomendaciones		79

Referencias bibliográficas.....	80
Anexos	1

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1: Herramientas para la mejora de procesos Lean Six Sigma	11
Tabla 2: Registro de muestras de producción diaria antes de la implementación	27
Tabla 3: Registro de muestras de producción diaria con la primera implementación: reducción de sobrecarga	28
Tabla 4: Registro de muestras de producción diaria con la segunda implementación: reducción de la variabilidad.....	29
Tabla 5: Registro de muestras de producción diaria con tercera implementación: reducción y / o eliminación de pérdidas.....	31
Tabla 6: Valores de la media según implementación Lean Six Sigma para los registros de producción diaria	32
Tabla 7: Análisis Estadístico Descriptivo de data antes de la primera implementación, fuente: Herramienta de Análisis de Datos de Estadística descriptiva	37
Tabla 8: Cálculo de Clases usando fórmula de Sturges para los datos antes de la primera implementación.....	38
Tabla 9: Cálculo de frecuencias de clases de data antes de la primera implementación	38
Tabla 10: Análisis Estadístico Descriptivo de data después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.....	39
Tabla 11: Cálculo de Clases usando fórmula de Sturges para los datos después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga	40
Tabla 12: Cálculo de frecuencias de clases de data después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.....	40
Tabla 13: Análisis Estadístico Descriptivo de data después de la segunda implementación: reducción de la variabilidad.....	41
Tabla 14: Cálculo de Clases usando fórmula de Sturges para los datos después de la segunda implementación reducción de la variabilidad	42

Tabla 15: Cálculo de frecuencias de clases de data después de la segunda implementación reducción de la variabilidad.....	42
Tabla 16: Análisis Estadístico Descriptivo de data después de la tercera implementación reducción y/o eliminación de pérdidas	43
Tabla 17: Cálculo de Clases usando fórmula de Sturges para los datos después de la tercera implementación reducción y / o eliminación de pérdidas.....	44
Tabla 18: Cálculo de frecuencias de clases de data después de la tercera implementación reducción y/o eliminación de pérdidas	44
Tabla 19: Fórmula para cálculo de atípicos.....	45
Tabla 20: Cuenta de datos atípicos antes de la primera implementación.....	45
Tabla 21: Cuenta de datos atípicos después de la primera implementación reducción de la sobrecarga.....	46
Tabla 22: Cuenta de datos atípicos después de la segunda implementación reducción de la variabilidad.....	46
Tabla 23: Cuenta de datos atípicos después de la tercera implementación reducción y / o eliminación de pérdidas	47
Tabla 24: Procesamiento de datos antes de la implementación para cálculo de parámetros de Kolmogorov Smirnov.....	48
Tabla 25: Cálculo de parámetros de Kolmogorov Smirnov antes de la implementación..	50
Tabla 26: Procesamiento de datos finalizada la implementación para cálculo de parámetros de Kolmogorov Smirnov.....	50
Tabla 27: Cálculo de parámetros de Kolmogorov Smirnov después de la implementación	52
Tabla 28: Pretesting antes y después de la implementación.....	69
Tabla 29: Prueba estadística t para medias de dos muestras emparejadas antes y después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.....	71
Tabla 30: Comparación entre las medias antes y después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.....	72

Tabla 31: Prueba estadística t para medias de dos muestras emparejadas antes y después de la segunda implementación: reducción de la variabilidad.....	72
Tabla 32: Comparación entre las medias antes y después de la segunda implementación: reducción de la variabilidad.....	73
Tabla 33: Prueba estadística t para medias de dos muestras emparejadas antes y después de la tercera implementación: reducción y / o eliminación de las pérdidas.....	74
Tabla 34: Comparación entre las medias antes y después de la tercera implementación: reducción y / o eliminación de pérdidas	74

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Mapeo de Temas	14
Figura 2: Plano de mina en operación	17
Figura 3: Flow Sheet de la Planta Zona Nueva Mina	18
Figura 4: Chancadora Primaria 63 X 75 Thyssenkrupp.....	19
Figura 5: Zaranda Lineal Metso	20
Figura 6: Chancadora Sandvik CH890.....	21
Figura 7: Reporte de Producción de Chancado y Transferencia.....	22
Figura 8: Principio de trabajo de poleas magnéticas.....	23
Figura 9: Bucket Wheel Reclaimer o Rotopala.....	24
Figura 10: Drum Reclaimer	25
Figura 11: Histograma de valores de media vs nivel de implementación	33
Figura 12: Aplicación web para cálculo de número de muestras.....	34
Figura 13: Histograma de datos de producción antes de implementación.....	39
Figura 14: Histograma de datos de producción después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.....	41
Figura 15: Histograma de datos de producción después de la segunda implementación reducción de la variabilidad.....	43
Figura 16: Histograma de datos de producción después de la tercera implementación reducción y/o eliminación de pérdidas	45
Figura 17: Análisis de correlación implementación vs media de tonelaje / día	47
Figura 18: Linealidad entre variables	53
Figura 19: Diagrama de cajas	54

Introducción

El presente trabajo tiene como intención, mostrar que la implementación de la metodología Lean Six Sigma permite lograr mejoras en los indicadores de producción de una operación minera, en este caso la implementación cubría la parte mina y parte de la planta, estas mejoras en los indicadores de producción son el resultado de los cambios realizados atacando las 3 grandes limitantes de la producción: la sobrecarga, la variabilidad y las pérdidas; todo esto dentro de la metodología Lean Six Sigma.

Se escogió hacer este trabajo, debido a la gran necesidad que existe en la minería a nivel nacional e internacional de tener mejores resultados operativos, debido al encarecimiento de los costos de operación y la volatilidad del precio internacional de los metales para maximizar sus beneficios, lo que lleva a las empresas a buscar alternativas para mejorar sus indicadores tanto como sea posible.

La metodología de investigación es cuantitativa, el alcance es correlacionar donde se busca relacionar 2 variables: la variable Implementación Lean Six sigma (esta variable a su vez consta de 3 variables) con la variable Incremento de Producción, con un diseño de investigación experimental, y la técnica de investigación es experimento puro. El objetivo del presente informe es demostrar que implementando la metodología Lean Six Sigma es posible alcanzar los objetivos de producción de la Ampliación Marcona.

Así en el primer capítulo Generalidades, nos muestra la realidad de la problemática peruana e internacional del sector minero, también presenta las características de la operación de la Ampliación Marcona, se presenta el planteamiento del problema, los objetivos de la investigación y la hipótesis establecida por el autor.

En el segundo capítulo se muestra el fundamento teórico del trabajo, con la teoría de Lean Six Sigma, donde detalla la historia del desarrollo de la metodología, conceptos de la teoría Lean Six Sigma, y una lista de las herramientas usadas en esta metodología. Así también hay una descripción de la operación de la mina y la planta con las

oportunidades de mejora en ellas y finalmente la definición de las variables dependiente e independiente y su relación entre ellas.

En el tercer capítulo se detalla la metodología de la investigación, donde se indica el tipo, alcance, diseño y técnica de la investigación, el tipo de población, muestra y la estrategia para la prueba de hipótesis.

En el cuarto capítulo se presentan los datos muestreados con la evaluación realizada en la hoja de cálculo, en tanto que en el quinto capítulo se presenta los resultados de la evaluación de estos datos y la contratación de la prueba de hipótesis.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones resultantes del presente trabajo.

Capítulo I. Parte introductoria del Trabajo

1.1 Generalidades

El cumplimiento de las metas de producción planificadas es el objetivo de la actividad minera (Sociedad Minera Cerro Verde, 2020, p. 17)., ya que se espera que por medio de ella se consigan los beneficios económicos proporcionales al esfuerzo realizado, siendo una de las principales preocupaciones de la dirección de operaciones, y para ello se analizan estrategias para recuperar la eficiencia y reducir costos.

Entre las estrategias para alcanzar la excelencia operativa destaca la metodología Lean Six Sigma (Rojas et al., 2017), la cual posee diferentes herramientas para mejorar los procesos operativos. Este sistema emplea la metodología Six Sigma y una conjugación de herramientas Lean y estadísticas (Asociación para el progreso de la Dirección, 2019).

Esta metodología se enfoca en atacar las 3 limitantes de la producción: la sobrecarga, la variabilidad y las pérdidas, (Socconini, 2017) los cuales deben ser identificados, evidenciados y reducidos o eliminados.

La aplicación de la metodología tiene como fin lograr que se cumplan los objetivos de la dirección en cuanto a costos, eficiencia, productividad.

1.2 Descripción del problema de investigación.

Haciendo una revisión de la bibliografía disponible relacionada al trabajo se presenta los siguientes aspectos.

1.2.1 Problemática de la industria minera

El Perú es un país con una antigua tradición minera que aun el día de hoy mantiene gracias a la presencia de empresas líderes a nivel mundial porque se tiene un enorme potencial geológico. En el mundo, el Perú se ubica entre los primeros productores de diversos metales como oro, plata, cobre, plomo, zinc, hierro, estaño, molibdeno, telurio, etc. Lo cual es reflejo no sólo de la abundancia de recursos y la capacidad de producción de la actividad minera peruana, sino de la estabilidad de la política económica que tiene nuestro país. Los minerales producidos en el Perú son de gran demanda en el mercado mundial,

cuyo desarrollo se basa en la producción y la industria (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

Los problemas que enfrentan en el presente las compañías mineras peruanas son los siguientes: licencia para operar, riesgos de alto impacto, productividad y costos en aumento, descarbonización y agenda ambiental, geopolítica, agenda de capital, fuerza laboral, volatilidad, digitalización y datos, innovación (EY, 2021).

La licencia para operar es el tema principal, actualmente un riesgo clave, y será más importante cuando las partes interesadas tengan una posición más fuerte, se debe considerar a las comunidades locales, a la comunidad nacional y el compromiso con dichas comunidades (EY, 2021).

Los riesgos de alto impacto, no son muy frecuentes, son poco evaluados, pero de alta importancia y también relacionada con la licencia para operar como es el caso del covid19 (EY, 2021).

La productividad y costos en aumento son preocupación a medida que aumenta la complejidad de la operación, los precios han sufrido variaciones debido a la presión de la oferta y demanda, y con las restricciones de la pandemia han surgido nuevos costos, por lo que se requiere un nuevo enfoque de costos y productividad en toda la cadena de valor (EY, 2021).

La presión para reducir los gases de efecto invernadero es el principal problema ambiental de las empresas mineras, esta depende del tipo de metal a tratar. Las empresas examinan las consecuencias a través de perspectivas legales, reglamentarias, tecnológicas y ambientales, exponiendo enfoques para descarbonizar sus emisiones (EY, 2021).

Los asuntos geopolíticos pueden tener impactos en las empresas como los papeles que hacen EEUU, China y la UE, donde los cambios en los equilibrios de poder generan inestabilidad en el mercado de metales. Así también las acciones gubernamentales propias de cada país productos y consumidor de metales (EY, 2021).

Con respecto a las agendas de capital, las empresas mineras actuaron con rapidez para optimizar la liquidez, administrando cuidadosamente el efectivo, dando prioridad a la operación de los activos básicos reduciendo o recortando los gastos de capital que no sean esenciales. Actuaron con cautela con los gastos de capital, retrasando decisiones de inversión, reduciendo la orientación de los gastos de capital, aplazando el pago de dividendos (EY, 2021).

Con respecto a la fuerza laboral, las empresas debieron proteger la salud y reducir el riesgo de exposición a causa de la pandemia en los lugares de trabajo, esto originó un costo financiero, por lo que se está considerando la opción de operación de forma remota o virtual, manteniendo los equipos de trabajos seguros, productivos y comprometidos (EY, 2021).

La volatilidad de los precios de los commodities ocasionado por las amenazas de sustitución y demanda cambiante exige decisiones sostenibles y de largo plazo, a causa de la pandemia se generó una disrupción a corto plazo de la oferta, aunque todavía el oro y la plata constituyen los refugios seguros, esto podrá ser cambiante en el futuro (EY, 2021).

La transformación digital y la identificación de datos relevantes son ahora un factor importante ya que los problemas de digitalización constituyen parte del día a día de las empresas mineras, y a medida que su transformación digital se hace más compleja se nota la importancia que tiene para lograr los objetivos de la organización (EY, 2021).

La innovación ha permitido a las empresas reducir costos, optimizar los recursos geológicos, incrementar la eficiencia del procesamiento y clasificación de minerales, mejorar la gestión de la seguridad, la gestión logística, la gestión energética, quedando pendiente aún la integración de la innovación a través de toda la empresa; sin embargo, ya se observan casos de mejora en este aspecto (EY, 2021).

1.2.2 Problema general

Considerando los problemas mencionados para nuestro estudio ¿En qué medida el incumplimiento de la meta de producción de mineral de la mina puede ser solucionado con la implementación de Lean Six Sigma?

1.3 Objetivos del Estudio

1.3.1 Objetivo general

Demostrar que el incumplimiento de la meta de producción de mineral de la mina puede ser solucionado con la implementación de la metodología Lean Six sigma.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar el incumplimiento de la meta de producción de mineral de la mina
- Implementar la metodología Lean Six sigma.

1.4 Hipótesis general de estudio

Con la implementación de la Metodología Lean Six sigma se logrará la meta de producción de mineral de la Mina.

1.4.1 Variable independiente

Es el valor que puede ser modificado en el experimento. En el caso de estudio la variable independiente es la implementación de LSS, la cual tiene 3 componentes: Reducción de la sobrecarga, Reducción de la variabilidad, Reducción de las pérdidas

1.4.2 Variable dependiente

Es el valor que depende de cómo se modifica la variable independiente. En el caso de estudio sería la producción

1.5 Antecedentes investigativos

Debemos mencionar que existen algunas experiencias previas en nuestro país y en el extranjero de aplicación de la metodología Lean Six Sigma, buscando mejoras en costos, productividad, eficiencia, etc., las cuales pasamos a mencionar

1.5.1 Antecedentes Locales

Paz A., (2015) "Optimización en minería subterránea a través de la metodología Lean Six Sigma". Este trabajo tenía como objetivo reducir el costo de sostenimiento en

labores de desarrollo y el costo de transporte de mineral y desmonte en mina, así también incrementar la producción en la parte alta de la mina (eliminación de pérdidas). El cual uso la siguiente metodología: a) Evaluación de condición inicial: donde se identificó que uno de los costos más altos que se tenía en mina es el sostenimiento, así se detectaron condiciones subestándares como la mala colocación de elementos de sostenimiento y pérdidas del material utilizado, encontrándose una oportunidad de ahorro en esta actividad. El objetivo del proyecto fue reducir el costo de sostenimiento en las labores de desarrollo. b) Analizar recomendaciones técnicas, el departamento de Geotecnia establecía que como mínimo se podía reducir los elementos de sostenimiento a 7 por metro de avance. c) Establecimiento de metas: Reducir el indicador de 7,70 elementos por metro de avance a 7 elementos. d) Medición, se aseguró la trazabilidad de los datos, en este caso de los elementos colocados por mes y de los metros avanzados por cada contrata. e) Reuniones de Análisis donde se realizó lluvia de ideas acerca de porqué el consumo de elementos de sostenimiento era alto, donde participaron 134 trabajadores, que aportaron 34 ideas acerca de los problemas que afectan el costo de sostenimiento. Luego se reunió a los especialistas (8 ingenieros), generándose la matriz de causa efecto, donde se priorizó el 50% de las ideas que obtuvieron el mayor puntaje acumulado a criterio del especialista. Se redujeron a 17 ideas después de la priorización, estas fueron sometidas a la matriz de esfuerzo e impacto. El resultado final de la etapa de medición nos dio la priorización de 7 ideas o causas potenciales, las cuales pasaron a análisis estadístico.

Todas las variables de decisión fueron sometidas a pruebas de hipótesis para ver si pasan a ser significativas y sobre las cuales se tomaría un plan de acción. También se realizó la misma prueba para la varianza, ya que si bien el proceso puede ser estable en cuanto a medias es muy importante también determinar su estabilidad en cuando a la forma que varía con el tiempo. Ellas fueron: 1) Falta de experiencia de la nueva cuadrilla de IESA (No influye), 2) Traslape de mallas deficiente. (No influye), 3) Falta de materiales para traslape con Split set (Causa principal), 4) Falta de materiales para traslape con pernos helicoidales. (Si influye), 5) Método de valorización poco confiable. (Si influye), 6) Falta de

malla de sostenimiento por tipo de labor. (No influye), 7) Dificultad en colocar elementos de sostenimiento en rampa positiva. (No influye). Como resultado se obtuvo un retorno financiero por encima de un millón de dólares en el plazo de un año. De un cash cost por encima de los U\$ 45/ton se pasó a tener valores menores a U\$ 38,9/ton en el costo de toda la unidad, así como de valores por encima de U\$ 26/ton se pasó a valores promedio de U\$ 22,6/ ton para el costo de producción del área de mina. El aporte en la reducción del costo de los tres proyectos ejecutados ha estado en el orden de U\$ 1,1/ ton, los cuales fueron de aporte directo en el costo directo del cash cost de mina.

Levano A. (2012) "Incremento de Productividad mediante herramientas SS". Este trabajo se enfoca en la reducción de la variabilidad de los procesos de mina analizando las desviaciones, usando las herramientas Six Sigma, para analizar los procesos claves de la operación minera, y buscar mejorar la capacidad del mismo y reducir la cantidad y costo del re trabajo, analizando indicadores de tiempo y productividad (Reducción de la variabilidad). Para ello se usó la metodología DMAIC: a) Definir oportunidades, definir la meta del proyecto enfocada en problemas reales, directamente relacionadas a resultados económicos. Se confeccionaron diagramas de flujo de los diferentes procesos para analizar qué se podía cambiar, eliminar o transferir en los diferentes procesos. Se analizaron los tiempos empleados en cada actividad y sub actividad por persona, equipo, turno, proceso. b) Medición de desempeño: Se hizo monitoreo de procesos, la recolección de datos de turnos, para mostrar cómo estaba la operación, se analizó rendimiento de personas, equipos, condiciones de operación, encontrándose operadores con mejor y peor desempeño, con las herramientas estadísticas se determinaron la variabilidad de los rendimientos para buscar las causas. c) Analizar oportunidades, se hace análisis causa raíz de los defectos, se identificó pérdidas de tiempo en maniobras de carguío, se asoció a problemas como el síndrome de Burnout y Mobbing laboral e insatisfacción laboral. d) Mejorar el desempeño: Se mejora el proceso eliminando defectos, basa la mejora en el largo plazo y disemina la mejora a lo largo de la organización. Se hizo una evaluación de medidas a implementar para eliminar las pérdidas de tiempo en cambios de turno y

maniobras de operación. e) Controlar el desempeño para mantener las prácticas que permiten incrementar la producción y eliminar los tiempos improductivos por cambios de turno y prácticas operativas. Este trabajo demostró que se podían obtener ingresos adicionales de 1 285000 USD por eliminación de tiempos improductivos, mejores prácticas de operación, mejor uso de la herramienta Dispatch con una inversión accesible para una empresa minera. La metodología Six sigma demuestra que es posible mejorar cualquier operador evidenciando las pérdidas y eliminándolas.

1.5.2 Antecedentes Internacionales

Castillo G., (2013) "Implementación de Metodología Lean en desarrollo minero". En este trabajo muestra como la aplicación de la metodología Lean le permite a la empresa minera El Teniente de Chile hacer mejoras en la realización de los trabajos de preparación e infraestructura de la mina subterránea. En este trabajo se usó la metodología del estudio de Caso. Esta metodología responde a 3 condiciones necesarias: tipo de pregunta de investigación, control del investigador sobre el comportamiento de los eventos y el foco de lo contemporáneo por sobre lo histórico del fenómeno. Se usa diversas fuentes de evidencia: documentación, archivos de registro, encuestas, entrevistas, observación directa, observación participativa. Se creó luego una base de datos del estudio del caso, manteniéndose una cadena evidencia entre las preguntas de investigación, la información y datos recolectados, y conclusiones obtenidas. Finalmente se hizo una triangulación de todos los datos obtenidos para que sean contrastados entre sí. Se utilizaron 3 casos distintos de 3 contratistas que realizaron trabajos para el Teniente en zonas distintas. Los pasos para la implementación de la metodología fueron: a) Diseño estratégico: Comprender el propósito, funcionamiento e interacciones de la empresa y definir los lineamientos estratégicos de la transformación Lean (objetivos, indicadores, actores clave, etc.). b) Construyendo cimientos: Entrenar a los actores claves de implementación, comunicar objetivos y estrategia de la transformación y comenzar implementación de proyectos piloto. c) Expansión y foco: Involucrar a toda la organización motivando implementación en todas las áreas de la empresa. d) Manteniendo: Asegurar la

mantención de la transformación en el tiempo, que sea parte de la cultura de la empresa. Al evaluar las medianas, el análisis de los diagramas boxplot y las pruebas de significancia para comparar los estados antes y después de la implementación se obtuvieron menores horas de ejecución y entrega de los proyectos de desarrollo, así se obtuvieron los siguientes resultados de mejoras para los 3 proyectos de implementación: en el primer caso se obtuvieron para el primer caso 1400 horas hombre al mes de reducción, para el segundo caso 990 horas hombres menos al mes y para el tercer caso estudiado 1600 horas hombre menos al mes. Los mismos resultados se obtuvieron para el avance físico del proyecto, para la confiabilidad del programa, la productividad, la eficiencia del tiempo.

Bahamondez M., (2017) "Implementación de Sistema de Gestión para reducción de costos optimizando el desempeño por componentes de equipos mineros". Este estudio tuvo como objetivo el desarrollo e implementación de un sistema de gestión para mejorar el desempeño, que presentaron los componentes de los equipos de carguío y transporte en Minera Escondida; aumentando la seguridad del operador, reduciendo el costo asociado al bajo desempeño por componente y manteniendo la continuidad de la operación. Se buscó alcanzar los planes de producción y los KPI's que presento la Gerencia de Operaciones Mina. Se usó la metodología Six Sigma DMAIC, identificando aquel componente que no está cumpliendo con la vida útil esperada, luego se analizó e identificó la principal causa del desgaste prematuro, para posteriormente seleccionar un sistema de medición de esta causa y a partir de este sistema evaluar los parámetros iniciales y los requerimientos de la compañía minera para así implementar distintos tipos de mejoras. Se identificó que los componentes que no cumplen con la vida útil esperada corresponden a los motores de tracción para el caso de los equipos de transporte, y los cables y baldes para el caso de los equipos de carguío. El desgaste prematuro de estos componentes se debe principalmente a las malas prácticas operacionales por parte de los operadores de estos equipos. Este factor se midió a través de eventos operacionales relacionados a la incorrecta aplicación del freno de servicio y parqueo en el caso de los camiones; y a la realización de Swing Impact y Boom Jack en el caso de las palas. Las

mejoras implementadas para disminuir la cantidad de eventos generados, se realizaron en tres etapas. La primera, se enfocó en generar información oportuna y a tiempo (en línea), la segunda, tuvo como objetivo mantener informada a la organización de los eventos ocurridos, y finalmente, la tercera etapa, se basó en un plan de acciones enfocados en reforzamientos operacionales sobre buenas prácticas. A partir de las mejoras se logró disminuir en un 52% la cantidad de eventos operacionales generados mensualmente en los camiones y en un 20% la cantidad de eventos operacionales generados mensualmente en las palas, lo que implicó un aumento en promedio, en un periodo de 4 meses (agosto, septiembre, octubre y noviembre de 2016), de un 5% en la vida útil por cable utilizado y de un 26% en la vida útil por balde utilizado. Esto significó un beneficio económico estimado para Minera Escondida de 2.96 millones de dólares en cuanto a la reducción de uso de estos componentes. Además, se obtuvo una reducción considerable en los costos por motores de tracción debido a la gran reducción de eventos operacionales asociados a estos que se obtuvo.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

Con el propósito de demostrar que la metodología Lean Six Sigma puede mejorar los procesos de una operación minera, pasamos a describir los puntos considerados para el análisis del problema que deseamos resolver.

2.1 Marco teórico

Las implementaciones de mejora de procesos son tan antiguas como la actividad industrial, estas han desarrollado herramientas que se han ido mejorando en el tiempo.

2.1.1 *Historia de las implementaciones de mejora de procesos*

El inicio de la búsqueda de mejoras en procesos se encuentra en el mejoramiento de la maquina a vapor de James Watt en 1796, agregando un condensador que permitía extraer el agua de las minas inundadas (Socconini, 2017).

Eli Whitney es pionero en el método de fabricación con una máquina de piezas intercambiables en 1798 (Socconini, 2017).

Frederick Taylor presenta en 1878 su estudio de la organización científica del trabajo donde institucionaliza la producción por lotes, la división en departamentos orientados a actividades específicas, y la estandarización del trabajo (Socconini, 2017).

Sakichi Toyoda patenta sus telares automáticos en 1890, operando con un dispositivo que suspendía su funcionamiento cuando se producía una falla (Socconini, 2017).

Henry Ford inicia la manufactura de su modelo T en 1908 fabricando 15 millones de unidades (Socconini, 2017).

En 1929 Kiichiro Toyoda, hijo de Sakichi, vende su diseño Tipo G a los hermanos Platt en Londres y con esa capital funda la Toyota Motor Company. [26]

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial Kiichiro Sakichi observa la baja productividad de los obreros japoneses (Socconini, 2017).

Los japoneses implementan el Control Estadístico de Procesos basados en los trabajos de Walter Shewhart (Socconini, 2017).

En 1950 Edward Deming hace un entrenamiento exhaustivo a ingenieros, gerentes y estudiantes japoneses. También participa Joseph Juran (Socconini, 2017).

Eiji Toyoda sobrino de Kiichiro se junta con Taiichi Ohno y crean el Sistema de Producción Toyota o Just in Time, dando fama por su trabajo a la Toyota Motor Company y se asocia con General Motors, dirige la empresa hasta 1994 (Socconini, 2017).

Taiichi Ohno en 1950 lidera el cambio que convierte a una fábrica de automóviles en la empresa más rentable de esa época (Socconini, 2017).

Shigeo Shingo realiza consultorías a Toyota en 1955 estudiando procesos y operaciones y su transformación en flujos continuos sin interrupciones, teniendo el concepto de la mejora de procesos y personas, creador del Poka Yoke y SMED (Socconini, 2017).

2.1.2 Herramientas Lean Six Sigma

En la **tabla 1** se presentan las diversas herramientas de la metodología Lean Six Sigma que nos ayudan en los proyectos de mejora de procesos.

Tabla 1

Herramientas para la mejora de procesos Lean Six Sigma

Hoshin Kanri	Poka Yoke
Mapeo de valor	8 Ds
Kaizen	Six Sigma
5 S	Kanban
Control Visual	Heijunka
TPM	Trabajo Estándar
Manufactura celular	Ahorro de energía
SMED	Contabilidad Lean
AMEF	

Fuente: Elaboración propia

Hoshin Kanri: Desarrollada en Japón, es una aplicación generalizada del ciclo de mejora continua, la organización despliega una serie de objetivos anuales, llamados

hoshin, para producir el alineamiento de todos sus niveles y adaptarse rápidamente a un entorno cambiante (Yacuzzi, 2005).

Poka Yoke: Técnica de mejora continua dedicada a evitar equivocaciones en cualquier proceso de producción y logístico (Socconini, 2017).

Mapeo de valor: Permite reconocer tanto las operaciones que aportan valor como las que no, identificando las fuentes de pérdidas tanto visibles como ocultas (Moreno et al., 2017).

8 Ds: Es usada para identificar y corregir problemas que se dan con más asiduidad en las empresas; siendo de gran utilidad en la mejora de productos y procesos. Establece una práctica estándar basada en hechos y se concentra en el origen del problema mediante la determinación de la causa raíz (Izaguirre et al., 2017)

Kaizen: Es el mejoramiento continuo, realizado por todos los empleados de la organización, a cada momento y en cualquier lugar de la empresa. Y que va de pequeñas mejoras incrementales a innovaciones drásticas y radicales (Suarez et al., 2019).

Six Sigma: Es una metodología compuesta por cinco fases: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Representa el número de desviaciones estándar obtenidas a la salida del proceso. Su objetivo de aumentar la capacidad de los procesos, de tal forma que estos generen los mínimos defectos por millón de unidades producidas. Estos defectos deben ser imperceptibles para el cliente (Navarro et al., 2017).

5 S: Su objetivo es promover, a nivel operacional, acciones variadas con la intención de favorecer la calidad de vida de los trabajadores, además de reducir costes, reducir residuos, aumentar la productividad y contribuir a una un entorno de trabajo más agradable, seguro y saludable (Carvalho de Souza, 2018).

Kanban: Es una estrategia para optimizar el flujo de valor a través de un proceso que utiliza Gestión visual y un sistema de extracción limitada de trabajo en progreso (Socconini, 2017).

Control Visual: conjunto de medidas prácticas de comunicación utilizadas con el propósito de plasmar, de forma evidente y sencilla, el estado de algún sistema productivo (Socconini, 2017).

Heijunka: Es una palabra japonesa que significa nivelación, se refiere a la nivelación de la producción, destinada a mejorar el flujo de un proceso para ajustarse mejor a la demanda del cliente, reducir las pérdidas, y disminuir o abandonar el procesamiento por lotes (Socconini, 2017).

TPM: Incrementar la fiabilidad de los equipos eliminando las fallas y pérdidas, utilizando la capacidad instalada de los equipos y aumentando la calidad del producto (Anaya, 2020).

Trabajo estándar: Nos permite contrarrestar situaciones de variabilidad en los procesos de fabricación, inexistencia de una secuencia detallada de procedimiento de trabajo y diversidad de productos (Barrientos y Tapia, 2020).

Manufactura celular: Manufactura celular es un concepto de fabricación en el que la distribución de la planta se mejora de manera significativa haciendo fluir la producción ininterrumpidamente entre cada operación, reduciendo drásticamente el tiempo de respuesta, maximizando las habilidades del personal y haciendo que cada empleado realice varias operaciones (Socconini, 2017).

Ahorro de energía: Un evento de ahorro de energía es un trabajo realizado por un equipo que comprende los conceptos relativos al consumo y aprovechamiento de la energía, como parte integral de los proyectos relacionados con Lean (Socconini, 2017).

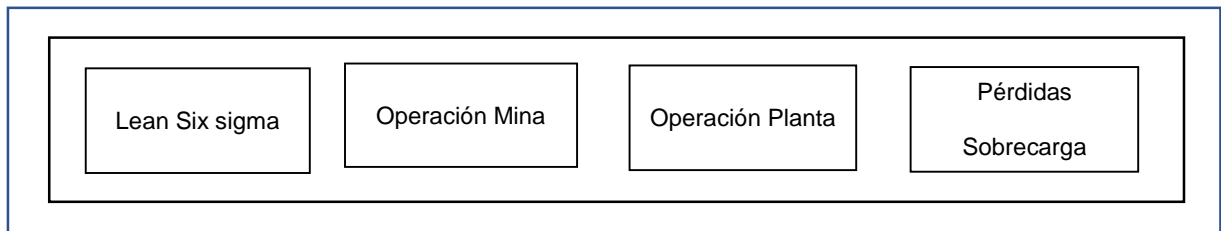
SMED: se utiliza cuando necesitamos reducir los tiempos de ciclo aprovechando al máximo el tiempo disponible para producir y utilizando menos tiempo para cambiar herramientas. [53] Contabilidad Lean: La contabilidad ágil o esbelta (Lean Accounting) es un método innovador para obtener datos, convertirlos en información valiosa y generar indicadores que apoyen el plan estratégico de la compañía, y para entender el mundo de los costos e indicadores clave de la compañía (Socconini, 2017).

AMEF: Es una metodología utilizada para maximizar la satisfacción del cliente, lo que implica definir, identificar, eliminar y/o reducir fallos que sean conocidos o potenciales en los sistemas, diseños, procesos y/o servicios (Socconini, 2017).

Para realizar la investigación de la implementación de la herramienta Lean Six Sigma vamos a indicar los elementos que se tuvieron que analizar para lograr el estudio, así en la Figura 1 se muestra el mapeo de temas considerados para el presente trabajo, cuyo detalle será desarrollado en el trabajo.

Figura 1

Mapeo de Temas



Fuente: Elaboración propia.

2.2. Marco conceptual

A continuación, se mostrarán los conceptos principales usados para desarrollar el trabajo.

Lean Six Sigma: Es una estrategia de negocios que emplea una metodología que busca eliminar las pérdidas, reducir la variabilidad de los procesos y minimizar errores, con el objetivo de lograr la satisfacción del cliente y obtener beneficios económicos en la Empresa. (Marín, 2015).

Limitantes de la productividad: Constituyen toda la variedad de problemas que impiden lograr los resultados que se desean obtener a partir de los recursos disponibles (Socconini, 2017).

Sobrecarga: Es la carga de trabajo que sobrepasa la capacidad de una empresa, proceso o persona (Socconini, 2017).

Variabilidad: Es la falta de uniformidad generada desde los elementos de entrada a los procesos, esto se traduce en falta de uniformidad en el mismo proceso y así se generan productos sin uniformidad (Socconini, 2017).

Pérdidas: Las pérdidas son todos aquellos esfuerzos realizados dentro de un proceso que no agregan valor al producto final (Morales, 2021).

Implementación: Es la realización de tareas para alcanzar un objetivo planificado basado en un plan que establezca en forma específica y cronológicamente como se van a llevar a cabo dichas tareas (Flores, 2022).

2.3 Operación mina y planta de hierro

Las operaciones de Hierro tradicionalmente se subdividen en zona seca (mina y conminución) y zona húmeda (beneficio), este trabajo fue realizado en la parte seca de la mina la cual se puede subdividir en operación de mina y operación planta.

2.3.1 Operación mina

La operación de la mina esta subdivida en las clásicas operaciones unitarias de perforación voladura, carguío y acarreo, los trabajos de perforación, carguío y acarreo son realizados por una contratista especializada en movimiento de material y la voladura se realiza con el apoyo del proveedor de explosivos.

2.3.1.1 Perforación. En nuestro estudio la perforación de producción es realizada por 6 perforadoras Sandvik 1190E, single pass y multipass eléctricas con diámetros de 12 ¼ ", 2 perforadoras Sandvik D75KS de 11" de diámetro y para precorte se utiliza las Sandvik Leopard DI560 con martillo en fondo. Los taladros se perforan hasta 16.5 metros para bancos de 15 metros de altura.

2.3.1.2 Voladura. La voladura se realiza de manera diaria por las exigencias de la producción, disparándose un máximo de 200 taladros por proyecto por consideraciones geotécnicas (cuidado de las paredes finales del tajo), pudiéndose hacerse máximo hasta 3 proyectos de voladura por tajo.

Desde el año 2019 se implementó la voladura con detonadores electrónicos en proyectos de mineral, haciéndose con accesorios pirotécnicos en los proyectos de desmonte, el trabajo se realiza por medio de una empresa especializada proveedora de los accesorios de voladura.

Los diseños de malla en mineral tienen hasta 5.5 metros de espaciamiento entre taladros y en desmonte hasta 11 metros de espaciamiento.

2.3.1.3 Carguío. El carguío se realiza con Palas electrohidráulicas 6040 Cat de 20 yd³ de capacidad de cuchara, las cuales son abastecidas con 4200 Voltios de energía de alta tensión provenientes de subestaciones ubicadas fuera del límite final del tajo. También se cuenta con un Cargador Frontal 994K y 2 Excavadoras Hitachi EX1800.

Con el fin de diluir elementos penalizantes en el mineral que afecten la calidad del producto refinado “torta” se realizan mezclas entre Palas y excavadoras con flujos de 2500 Tons / hr y 500 Tons / hora respectivamente para diluir los penalizantes (azufre, zinc).

Los frentes de carguío son marcados con banderas para delimitar los diferentes tipos de materiales (mineral de alta ley, mineral de baja ley, óxidos, desmonte y encapado de roca), los cuales tienen diferentes tratamientos en mina y planta.

Para la elaboración de los planes de minado diario, semanal y mensual, se realizan reuniones en coordinación con Planeamiento Mina, Operaciones Zona Nueva, Control de Calidad, Topografía, Geotecnia, Voladura, y estas coordinaciones son plasmadas en los planos.

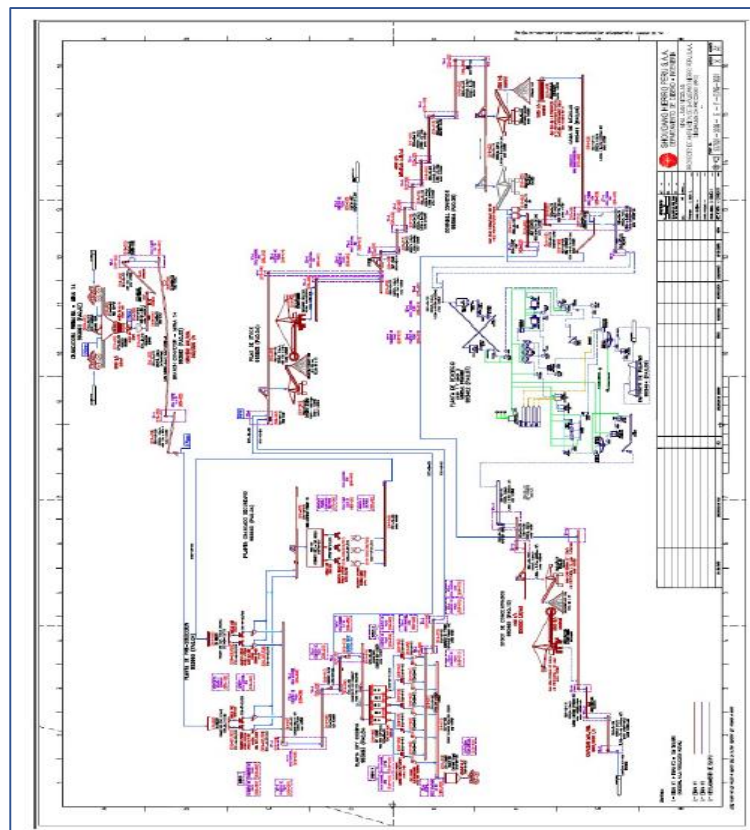
En la Figura 2 vemos un plano de una de las minas en operación en Marcona, la mina 16 donde están diferenciados con colores: verde para el material desmonte y rojo para el material oxido, los cuales a su vez estarán marcados en campo con los mismos colores por medio de estacas o banderas. Así es posible definir los destinos de los materiales.

2.4.2. Operación planta

La planta donde se realizó el trabajo es parte de la zona seca la cual comprende las plantas de: chancado primario, zarandas, chancado secundario, separación magnética, sistema de fajas, equipos de apilamiento y equipos de reclamo. Esta planta es cliente interno de las minas 11,14 y 16 de donde proviene el material que la alimenta. En la Figura 3 se muestra el Flow sheet de esta planta donde se aprecian los diferentes componentes de la planta y el flujo de transferencia de material. El cliente de esta planta es la planta húmeda que está fuera del análisis de este trabajo.

Figura 3

Flow Sheet de la Planta Zona Nueva Mina



Fuente: Departamento de Ingeniería Shougang Hierro Perú.

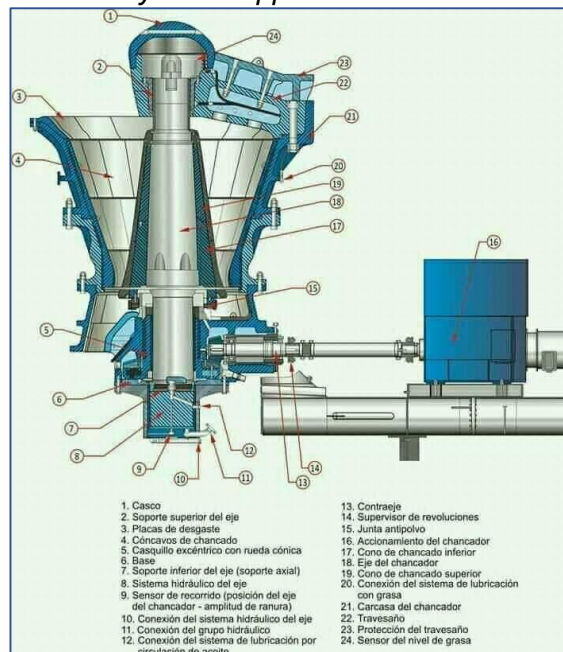
2.4.2.1 Chancado primario. El chancado primario recibe el mineral proveniente de los tajos, siendo una chancadora Thyssenkrupp 63 x 75 giratoria, que recibe mineral con malla de fragmentación P100 = 100 cm, P80 = 45 cm, y entrega un material con

granulometría F80 = 30.48 cm, el flujo horario máximo que puede recibir es 3500 Tons / hora, siendo restringido por los equipos que se encuentran aguas abajo.

En la Figura 4 se muestra un perfil de la chancadora con sus componentes principales. Esta chancadora entrega el mineral a una faja llamada Faja de sacrificio con un ancho de 200 cm y espesor de 4.5 cm, y luego el material pasa a 3 fajas adicionales que suman aproximadamente 10 km para llegar a la planta de zarandas.

Figura 4

Chancadora Primaria 63 X 75 Thyssenkrupp



Fuente: Manuel de Operación Thyssenkrupp para el cliente Shougang Hierro Perú

2.4.2.2. Planta de zarandas. La planta de zarandas recibe el mineral proveniente de la Planta de Chancadora Primario a través del sistema de fajas transportadoras, consta de una tolva de 300 toneladas de capacidad y 2 zarandas Metso con sus alimentadores Sandvik que pueden trabajar en paralelo y 2 zarandas Haver and Boecker, cuya función es separar el mineral grueso del fino, el mineral grueso con tamaño mayor a 0.36 cm es enviado a la planta de chancado secundario para su posterior reducción y retorno a la planta de zaranda, el mineral fino es transferido al sistema de fajas para su envío a los stocks de chancado secundario. En la Figura 5 se observa una imagen del equipo de zaranda lineal Metso que es usado en mina Marcona, la cual recibe mineral de granulometría con un P80 = 17,5 cm separando el mineral fino con tamaño menor a 4 cm,

el cual se enviara a apilamiento y el material mayor a 4 cm ira a la planta de chancado secundario.

Figura 5

Zaranda Lineal Metso

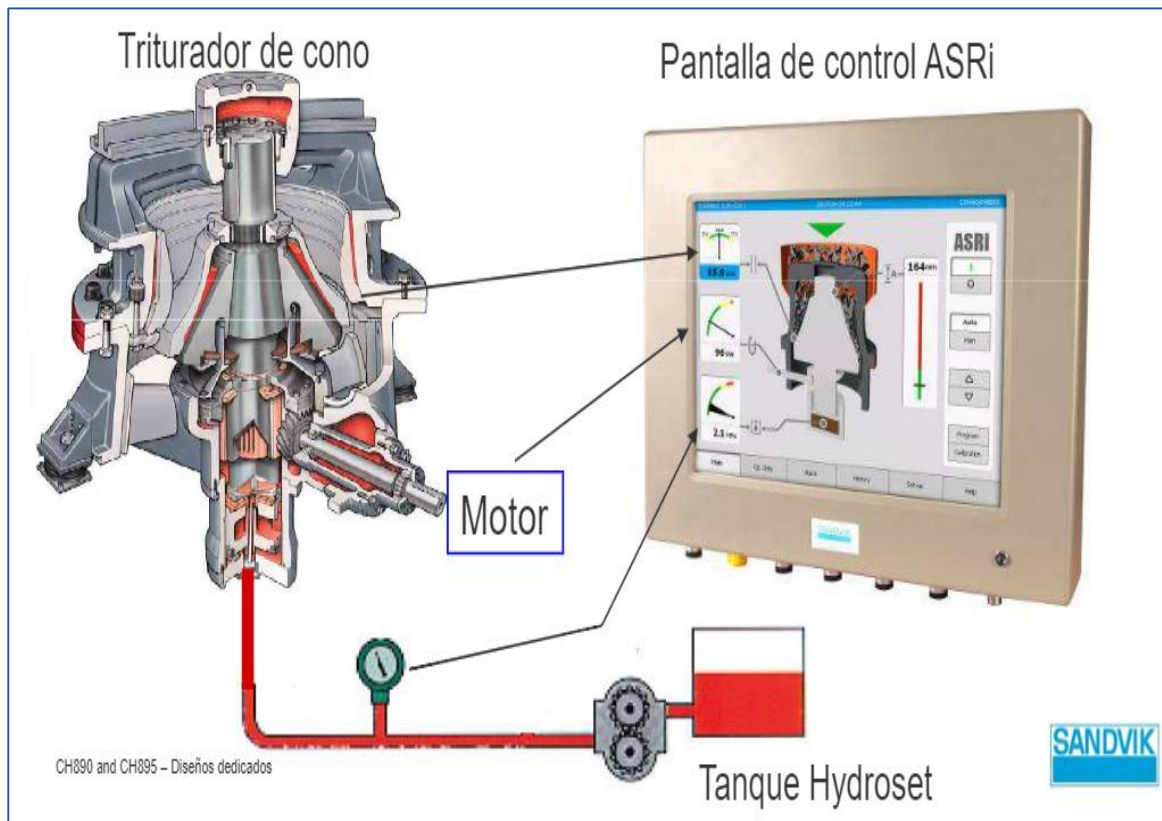


Fuente: Manual de Zaranda Metso para cliente Shougang Hierro Perú

2.4.2.3 Planta de chancado secundario. La planta de Chancado Secundario consta de 3 chancadoras giratorias Sandvik CH890i de 2200 toneladas de capacidad cada una, que pueden trabajar en paralelo para reducir el mineral a tamaño de 0.36 cm, el mineral proviene de las zarandas Metso y luego de que se ha reducido su tamaño se transfiere por faja a las zarandas Haver and Boecker para la separación de algún remanente de material grueso y continuar el ciclo de transferencia. En la Figura 6 se observa la chancadora Sandvik CH890 con la pantalla de visualización de parámetros para el operador, en esta chancadora el material recibido se reduce a tamaños menores a 4 cm. Para luego ser transferido a la zona de apilamiento.

Figura 6

Chancadora Sandvik CH890



Fuente: Manual Sandvik de Chancadora CH890 para cliente Shougang Hierro Perú.

El control del mineral chancado es registrado por el personal denominado Performance quien registra la producción diaria de las diferentes líneas de producción. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de un formato de registro de control de la producción donde se muestra el avance diario del minado de los diferentes materiales, alta ley, baja ley, óxidos, desmonte, así como el cumplimiento del planeamiento mensual.

Figura 7

Reporte de Producción de Chancado y Transferencia

COMPOSITO AMPLIACION DE PRODUCCION AL 31/12/2020

FECHA DE EMISION: 01/01/2021
Pág. 3/3

DIA	HORAS CULTEO	CHANCADO PRIMARIO			PROCESO STOCK MINA				CONVERTIDO NUEVO STOCK MINA			A LARITA BENEFICIO 2H (M3)	PLANTAS BENEFICIO EXISTENTE	ENVIO A LAJA 2H
		MINERAL P/AL	MINERAL P/BE	TOTAL CHANCADO	PROCESADO STOCK MINA	AVUADO	DIRECTO	RECICO	SECCO SUPLENIMTO	ENVIO (M3)	TOKOR SAN NICOLAS			
1	21	44,716	-	44,716	46,035	40,035	-	(6,117)	56,353	30,117	118,003	42,300	33,500	-
2	24	44,332	-	44,332	45,643	40,643	-	(5,600)	44,310	50,603	137,746	40,000	34,500	-
3	24	51,538	-	51,538	50,328	40,328	-	(5,229)	45,118	45,223	136,945	41,000	33,700	-
4	24	40,166	-	40,166	37,128	30,128	-	(3,500)	33,628	30,128	124,834	34,000	30,170	-
5	24	50,876	-	50,876	50,781	37,781	-	(3,520)	34,261	30,533	186,355	-	-	-
6	24	50,876	-	50,876	50,781	37,781	-	(3,520)	34,261	30,533	186,355	-	-	-
7	24	44,737	-	44,737	44,730	44,730	-	(3,426)	30,304	52,456	280,021	30,000	20,000	-
8	24	43,351	-	43,351	44,646	44,646	-	(3,179)	103,829	31,781	189,392	40,500	30,460	-
9	24	53,816	-	53,816	52,744	52,744	-	(3,170)	36,490	53,170	217,472	41,000	31,200	-
10	24	55,637	-	55,637	56,723	56,723	-	(3,635)	145,871	3,655	216,137	11,000	5,000	-
11	24	25,676	-	25,676	25,668	25,668	-	-	176,159	-	167,127	40,000	31,270	-
12	24	10,828	33,928	44,756	39,442	39,442	-	(37,207)	173,094	37,207	136,234	40,460	31,100	-
13	24	-	45,121	45,121	37,637	37,637	(5,600)	(39,450)	165,995	46,220	167,940	49,500	27,100	-
14	24	47,254	744	48,000	40,162	40,162	-	(33,248)	160,421	53,466	170,796	31,500	21,000	-
15	24	48,928	-	48,928	50,060	50,060	-	(3,166)	156,775	51,686	275,352	17,000	11,600	-
16	24	43,131	-	43,131	43,465	43,465	-	(4,105)	161,346	41,052	260,994	-	-	-
17	24	44,974	-	44,974	46,181	23,201	(16,710)	(49,768)	168,192	40,768	262,490	48,000	35,000	-
18	24	36,682	-	36,682	53,214	53,214	-	(39,690)	108,745	53,660	276,530	40,500	31,500	-
19	24	55,292	-	55,292	55,844	55,844	-	(34,650)	149,894	34,650	583,355	40,500	24,500	-
20	24	62,426	-	62,426	61,243	61,243	-	(12,262)	170,265	12,262	312,817	8,000	9,770	-
21	24	59,694	-	59,694	59,835	59,835	-	-	235,870	-	315,817	-	-	-
22	24	19,246	55,269	74,515	37,243	37,243	-	-	276,090	-	312,817	-	-	-
23	24	-	-	-	-	-	-	-	276,090	-	312,817	-	-	-
24	24	-	-	-	-	-	-	-	276,090	-	312,817	-	-	-
25	24	-	-	-	-	-	-	-	276,090	-	312,817	-	-	-
26	24	-	12,423	12,423	7,973	7,973	-	(1,553)	281,195	1,551	276,317	34,100	28,000	-
27	24	40,364	-	40,364	37,662	37,662	-	(8,810)	260,121	8,810	164,488	47,000	28,000	-
28	24	4,645	4,175	8,820	10,546	10,546	-	(4,747)	294,121	40,247	146,095	40,500	20,000	-
29	24	10,681	-	10,681	10,666	10,666	-	(39,270)	234,127	39,270	200,600	59,000	20,600	-
30	24	20,626	-	20,626	20,166	20,166	-	(39,270)	234,127	39,270	200,600	59,000	20,600	-
31	24	308,632	364,061	672,693	1,130,131	1,133,241	(672,693)	(652,438)	374,421	652,438	1,42,613	871,300	657,500	-
TOTAL PLAN MES		586,086	260,068	846,154	1,320,000	1,320,000	-	-	1,133,000	1,133,000	1,133,000	1,130,000	700,000	-
YIELDACION		16,632	(73,332)	(56,700)	(37,807)	(37,807)	-	-	(243,671)	-	(243,671)	(648,700)	(92,100)	-
% Cumplimiento		101,8	68,4	96,3	78,7	78,7	-	-	78,7	-	78,7	77,8	82,8	-
Promedio (Total Real por día efectivo)		41,566	23,437	43,041	37,660	37,660	-	-	37,660	-	37,660	36,304	25,020	-
PRODUCCION 2H		201,812	7,742	209,554	35,230	35,230	-	-	35,230	-	35,230	35,120	22,501	-
Días programados mes		31	31	31	31	31	-	-	31	-	31	31	31	-
Días efectivos a la fecha		24	24	24	24	24	-	-	24	-	24	24	24	-
% Porcentaje cumplimiento a la fecha		77,4	22,6	77,1	77,1	77,1	-	-	77,1	-	77,1	77,4	77,4	-

* Fuente: Reporte de Producción de Planta Mineralizadora Nueva.

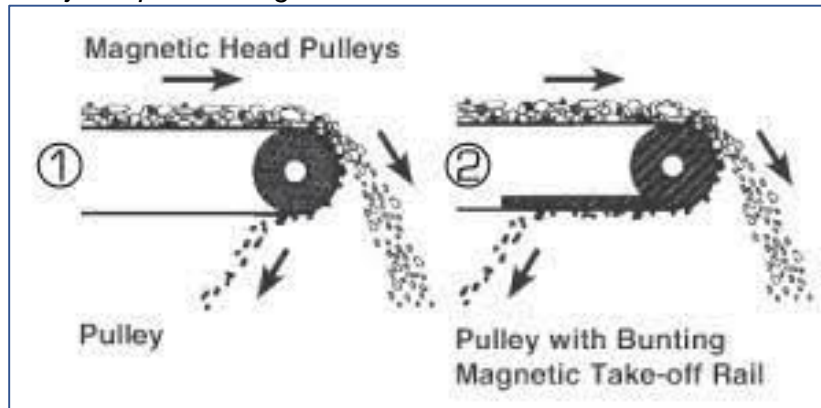
Fuente: Area de Performance Operaciones Zona Nueva Mina.

2.4.2.4 Planta de dry cobbing. La planta de Dry Cobbing o Separación Magnética tiene como función procesar el mineral con menores contenidos de Hierro, en el rango de 30% a 48% de Ley de Hierro, a través de poleas imantadas recogen la mejor ley y el remanente es trasferido por fajas a una tolva donde un camión recoge el material y lo deposita en un botadero. El material de mejor ley es transferido por fajas al Stock de

chancado secundario. En la Figura 8 se presenta el principio de funcionamiento de una polea magnética, donde por efecto de la aplicación de energía eléctrica se incrementa el magnetismo en una polea que realiza la separación de materiales.

Figura 8

Principio de trabajo de poleas magnéticas



Fuente: Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento Eriez Magnetic - Sandvik para Shougang Hierro Perú Paquete 4.

2.4.2.5 Sistema de fajas. El sistema de fajas de la Ampliación Mina Marcona parte seca consta de 26 fajas transportadoras con una longitud total suma 30 km de fajas y cuyo arranque y parada está controlado a través de un sistema automatizado con una sala de control, donde además se pueden visualizar los parámetros de la planta.

2.4.2.6 Equipos de apilamiento. Se cuenta con 2 equipos de apilamiento, en el stock de Chancado Secundario se ubica el Stacker Sandvik que dispone de un espacio de apilamiento para 450 000 toneladas de mineral, y en el Stock de Crudos se tiene el Stacker Thyssenkrupp con un espacio de apilamiento de 550 000 toneladas de mineral, ambos equipos tienen la opción de by pass la cual le permite obviar el apilamiento y realizar transferencia de mineral por el sistema de fajas a las siguientes líneas de producción.

2.4.2.7 Equipos de reclamo. Se cuenta con 2 equipos de reclamo, en el stock de chancado secundario se tiene el Bucket Wheel Reclaimer o Rotopala, el cual es un equipo que se moviliza a través de un riel, con cucharas móviles alrededor de un eje que recoge el material apilado a una faja interna del equipo llamada faja boom y la descarga al sistema de fajas transportadoras hacia las líneas siguientes, su fin es el recojo continuo de material aprovechando las pilas para hacer mezclas de material. En la Figura 9 se observa

el Bucket Wheel Reclaimer realizando el recojo de mineral en el stock del paquete 4 de la zona nueva mina, este material es transferido luego por el sistema de fajas Down Hill hasta el paquete 6 donde se apilará para su posterior recojo.

Figura 9

Bucket Wheel Reclaimer o Rotopala



Fuente: Pineda R, 2022, Bucket Wheel, Stock de Paquete 4 Zona Nueva Shougang Hierro Perú.

En el stock de crudos se tiene el Drum Reclaimer, el cual es un tambor giratorio que se mueve a través de 2 rieles con cucharas que recogen mineral hacia una faja interna la cual a su vez descarga en la línea de transferencia, con el mismo fin de realizar un correcto mezclado de los materiales de pila. En la Figura 10 se observa el equipo Drum Reclaimer, el cual tiene como principal filosofía de operación lograr la mejor mezcla de los materiales apilados.

Figura 10

Drum Reclaimer



Fuente: Pineda R, 2022, Drum Reclaimer, Stock de Paquete 6 Zona Nueva Shougang Hierro Perú.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

La investigación siendo un proceso sistemático, crítico y empírico, aplicado al estudio de un fenómeno, ha sido clasificada a lo largo de la historia de la ciencia según las corrientes de pensamiento y diversos marcos interpretativos. La siguiente clasificación obedece a estos criterios (Madariaga, 2013).

3.1 Recolección de datos

La recolección de datos se obtiene a través de la información proveniente de las balanzas de las diferentes fajas del sistema, esta información es registrada en la base de datos de la Sala de Control de Automatización. Se genera un reporte horario dirigido al supervisor de turno quien debe asegurar el flujo correcto estimado por el sistema de fajas de acuerdo a la capacidad de diseño. Al final del día se entrega un reporte a la gerencia con la producción total procesada por Chancadora en 24 horas de producción, es en base a ese reporte que se hará el análisis.

3.1.1 Recolección de datos para analizar la sobrecarga

El análisis de la sobrecarga fue el primer paso para corroborar la efectividad de la mejora, antes de la aplicación de reducción de la sobrecarga se tomaron 74 muestras y luego de la aplicación de la primera implementación se analizaron 90 días de producción requiriéndose 74 muestras. La producción diaria se registra en cuadros en base a la información recolectada de las balanzas de las fajas transportadoras ponderadas con las balanzas de los camiones de acarreo, esta información genera reportes horarios, por turno, por día, semana y mes, para nuestro análisis se utilizará la producción de un día. En la Tabla 2 se presenta los registros de producción diaria antes de la primera implementación.

Tabla 2*Registro de muestras de producción diaria antes de la implementación LSS*

1	42837	28	41587	55	37005
2	40770	29	35121	56	40009
3	43633	30	43974	57	39366
4	39914	31	39995	58	38364
5	40740	32	39561	59	35279
6	41771	33	39706	60	41050
7	36932	34	39701	61	40662
8	40790	35	39181	62	38886
9	41670	36	36741	63	39981
10	42281	37	37555	64	38418
11	39676	38	39675	65	38917
12	38579	39	41132	66	38065
13	42197	40	40342	67	37240
14	39810	41	39693	68	35719
15	38683	42	42145	69	35609
16	41160	43	40113	70	38320
17	43900	44	37464	71	39667
18	40673	45	39707	72	37387
19	41449	46	42970	73	40820
20	38166	47	40818	74	40240
21	37298	48	39496		
22	38378	49	42961		
23	37080	50	39418		
24	38102	51	37727		
25	37934	52	39802		
26	36621	53	41190		
27	36972	54	38826		
	39,535		Promedio		
	2,045		Des. Std		

Fuente: Elaboración propia

En la primera implementación se espera que reduciendo el flujo de mineral procesado por chancadora de 3000 tons / hr a 2700 tons / hr se logre una mayor tasa de producción diaria, entendiendo que el sistema está expuesto a una sobrecarga de trabajo. Analizando el sistema se encontró que la faja 014-003 de 8.7 km de longitud tenía un subdimensionamiento de fabricación, con empalmes cortos que tenían menor resistencia a la tracción, produciéndose varios eventos de rotura de faja en los empalmes cuando era

sometida a la exigencia de 3000 tons / hr. También los chutes de intercambio de material entre fajas sufrían continuos atoros al trabajar a este flujo de 3000 tons / hr.

También la planta de zaranda estaba subdimensionada para el flujo de 3000 tons / hr encontrándose componentes con desgaste prematuro, que obligaban a realizar paradas continuas de producción. Todos estos problemas ocurrían cuando se intentaba trabajar a un flujo de 3000 tons / hr. En la Tabla 3 se muestra el registro de producción con la primera parte de la implementación: reducción de la sobrecarga.

Tabla 3

Registro de muestras de producción diaria con la 1ª. implementación: reducción de sobrecarga

PRODUCCIÓN DIARIA CON REDUCCIÓN DE SOBRCARGA					
1	43,568	26	41587	51	45,336
2	42,780	27	35121	52	43,339
3	39,650	28	43974	53	43,578
4	45,890	29	39995	54	43,339
5	44,890	30	39561	55	42,478
6	43,789	31	39706	56	43,267
7	46,809	32	39701	57	43,227
8	46,709	33	39181	58	41,779
9	46,670	34	36741	59	46,380
10	49,324	35	37555	60	45,380
11	41,679	36	39675	61	42,587
12	39,792	37	41132	62	41,430
13	47,365	38	40342	63	44,340
14	42,578	39	39693	64	46,220
15	43,680	40	42145	65	49,250
16	42,478	41	40113	66	44,229
17	45,236	42	37464	67	45,180
18	43,236	43	39707	68	45,993
19	46,630	44	42970	69	44,772
20	45,337	45	40818	70	44,368
21	42,438	46	39496	71	45,890
22	43,446	47	42961	72	44,371
23	39,780	48	39418	73	45,306
24	43,520	49	37727	74	46,246
25	46,378	50	39802		
	44,354		Promedio		
	1,883		Des. Std		

Fuente:Elaboración propia.

3.1.2. *Recolección de datos para analizar la variabilidad*

Con respecto a la variabilidad, los datos que se registraron fueron los que se generaron antes de la implementación donde se chancaba mineral considerando solo como restricción el tamaño menor a 1 metro y después cuando se implementó la voladura electrónica y se restringió el tamaño del mineral a un factor $F80 = 45$ cm. Esta mejora en la fragmentación a un tamaño apropiado a las características de la Chancadora Primaria se debe ver reflejada en la toma de datos. Para analizar las nuevas tomas de muestras se considera un periodo de 3 meses para la nueva implementación o 150 días calendarios comparados con los 153 días de la anterior implementación. Para 150 días aplicando la misma fórmula se obtiene un valor parecido de 28 muestras que son las consideradas en el siguiente paso. En la Tabla 4 se muestra el registro de producción con la implementación de la reducción de la variabilidad.

Tabla 4

Registro de muestras de producción diaria con la 2ª. implementación: reducción de la variabilidad

PRODUCCIÓN DIARIA SIN IMPLMENTAXION LSS					
1	44,569	26	47,247	51	43,114
2	45,780	27	44,268	52	46,138
3	42,785	28	42,534	53	46,338
4	43,573	29	44,360	54	46,227
5	46,579	30	47,250	55	44,337
6	45,137	31	43,550	56	47,224
7	42,368	32	46,224	57	42,170
8	45,790	33	45,231	58	43,287
9	43,890	34	47,220	59	45,225
10	47,856	35	43,460	60	47,330
11	46,395	36	46,224	61	45,680
12	46,439	37	45,360	62	46,330
13	47,890	38	45,322	63	42,670
14	44,387	39	44,980	64	47,339
15	44,579	40	43,185	65	45,370
16	46,490	41	47,244	66	46,479
17	47,368	42	44,288	67	43,778

18	43,422	43	43,690	68	44,379
19	45,258	44	45,134	69	45,478
20	44,370	45	45,337	70	45,670
21	42,407	46	46,224	71	47,339
22	45,111	47	46,119	72	46,248
23	46,983	48	44,373	73	43,226
24	45,780	49	44,228	74	46,238
25	43,564	50	43,976		
	45,181		Promedio		
	1,511		Des. Std		

Fuente: Elaboración propia

La reducción de la variabilidad se atacó con el material que pasaba por las plantas, antes de la implementación se procesaba y transfería material con especificaciones fuera del rango de diseño de las plantas, fragmentos de roca sobredimensionados que ocasionaban atoros en chutes, excesiva recirculación de chancadora secundaria, desgaste prematuro de componentes de plantas, no existía un monitoreo de la fragmentación del mineral procesado por las plantas, solo existía un muestreo de 1 metro de faja que recogía en un saco a laboratorio por muestreo de leyes y también se hacía un muestreo de fragmentación el cual a todas luces claramente insuficiente, debido a que daba valores con mucha dispersión entre muestreos para un mismo frente de carguío.

Con la implementación de la voladura electrónica, haciendo seguimiento con análisis de fragmentación y calibración de setting de chancadora, se estabilizaron los valores de fragmentación a un P80= 45 cm (fragmentación de material que proviene de la mina), y un F80= 30.5 cm (fragmentación resultante del proceso de chancado), se logró un mejor flujo que se relaciona con reducción de atoros en chutes de descarga, menor desgaste de blindajes y mayor vida útil con la consiguiente reducción de tiempos de parada para mantenimientos de planta e incremento de la disponibilidad operativa con el incremento de producción respectivo.

3.1.3. *Recolección de datos para analizar la reducción y / o eliminación de pérdidas*

De manera análoga a como se realizó en el paso anterior para atacar la sobrecarga y la variabilidad, se implementaron medidas para reducir y / o eliminar las pérdidas en la operación y en el mantenimiento de la planta, y de igual manera se consideró un periodo de tres meses para analizar el impacto de estas acciones en la producción de la planta. En la Tabla 5 se muestra el registro de datos después de la última implementación.

Tabla 5

Registro de muestras de producción diaria con la 3ª. tercera implementación: reducción y/o eliminación de pérdidas.

PRODUCCIÓN DIARIA SIN IMPLMENTACION LSS					
1	47,698	26	46,586	51	46,228
2	46,794	27	47,249	52	44,660
3	47,134	28	44,395	53	46,580
4	48,670	29	45,799	54	47,136
5	47,256	30	47,850	55	46,269
6	47,460	31	46,995	56	45,359
7	47,380	32	47,330	57	47,335
8	45,790	33	45,409	58	46,228
9	46,750	34	43,448	59	48,336
10	49,360	35	47,980	60	47,093
11	46,395	36	46,385	61	45,337
12	46,439	37	48,247	62	46,338
13	47,890	38	45,956	63	47,336
14	46,280	39	46,870	64	46,885
15	48,996	40	45,994	65	47,440
16	44,367	41	49,588	66	49,339
17	46,547	42	46,380	67	48,336
18	47,550	43	47,330	68	47,885
19	46,885	44	45,870	69	45,337
20	46,614	45	47,360	70	46,378
21	47,226	46	49,336	71	49,056
22	45,317	47	48,660	72	48,359
23	48,932	48	48,395	73	44,337
24	46,792	49	47,559	74	46,996
25	47,936	50	47,637		
	46,995		Promedio		
	1,145		Des. Std		

Fuente: Elaboración propia

La eliminación de pérdidas, relacionadas con paradas innecesarias de planta para incrementar el tiempo disponible para producir permitió el incremento de producción. Se encontró que se realizaban en un turno varias y diferentes paradas de planta no programadas por reportes del personal operativo, las fallas mecánicas se atendían de manera individual, este método de trabajo se mejora haciendo que el personal evalúe si la falla podía esperar unas horas hasta que el personal mecánico haya organizado su personal y recursos y pueda atender varias fallas al mismo tiempo haciendo una sola parada para atender múltiples fallas no programadas mientras la planta se iba estabilizando, seguidamente se implementaron las paradas programadas de planta. También se atacaron otras pérdidas relacionadas con tiempos muertos por cambios de guardia, refrigerios, traslados de personal, atoros por inchables, problemas de comunicación, etc., que también ayudaron en el incremento de producción. En la Tabla 6 se muestran los valores de la media conforme se va implementando la metodología.

Tabla 6

Valores de la media según implementación Lean Six Sigma para los registros de producción diaria.

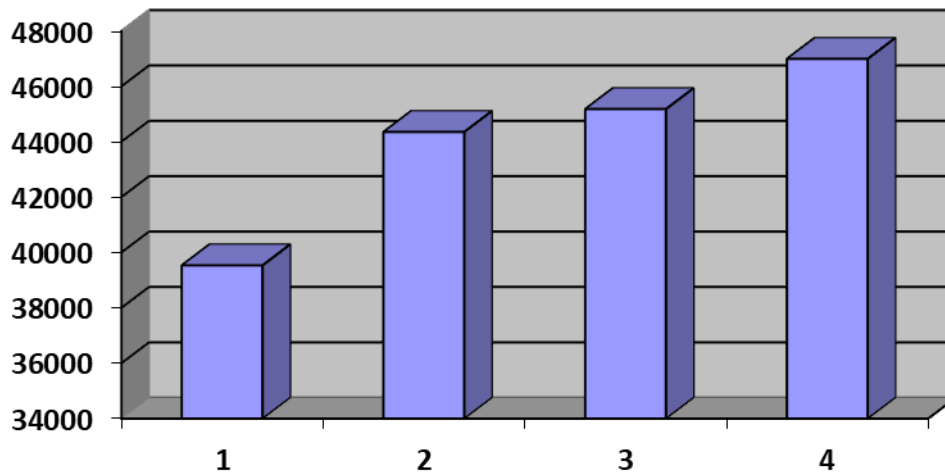
GRADO DE IMPLEMENTACIÓN	MEDIA (TONS/DIA)
NO IMPLEMENTACIÓN	39535
REDUCCIÓN SOBRECARGAR	44354
REDUCCIÓN SOBRECARGA + REDUCCIÓN VARIABILIDAD	45181
REDUCCIÓN SOBRECARGA + REDUCCIÓN VARIABILIDAD + REDUCCIÓN Y / O ELIMINACIÓN DE DESPERDICION	46995

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 se presenta la gráfica de incremento del valor de la media conforme se realiza cada mejora o implementación.

Figura 11

Histograma de valores de media vs nivel de implementación.



1. No implementado, 2. Primera implementación: reducción de la sobrecarga, 3. Segunda implementación: reducción de la variabilidad, 4. Implementación completa: reducción y/ o eliminación de desperdicios.

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Población y muestra

Como nuestro interés es medir los efectos de la implementación LSS en la variable dependiente: Incremento de Producción, mediremos los cambios en la producción de Chancadora, para ello usaremos como unidad de medida la producción diaria (Tons / día).

La **población** está delimitada o consiste en todos los registros de producción diario (Tons / día) generados antes y después de la implementación LSS en la operación de la planta. Consideramos la producción diaria por sobre la producción horaria porque la producción horaria puede ser afectada por factores ajenos al tema de interés pero que también son mejorables con la implementación de LSS, como los cambios de turno, refrigerios, paradas no programadas de planta, estos elementos afectan todos los días de producción horaria, pero analizando hora a hora encontramos unidades que no se afectan y otras que si están afectadas, tratamos que la muestra sea estadísticamente representativa.

Los registros de producción sin implementación de mejoras, se realizaron en un periodo de dos años cuatro meses. Luego se realizó la primera implementación en un periodo de 3 meses, y con implementaciones sucesivas de 3 meses para las siguientes

implementaciones. Para poder hacer el cálculo del número de muestras se usó una aplicación web ⁽⁶³⁾, y para poder hacer la comparación entre medias usando la prueba T-student se consideró usar el mismo periodo de tiempo antes y para cada implementación, la cual arrojó como resultado 90 muestras por grupo de datos analizar. En la Figura 12 se muestra la aplicación web donde se hizo el cálculo.

Figura 12

Aplicación web para cálculo de número de muestras

Fuente: es surveymonkey.es

Donde:

Tamaño de la población: Se refiere al número de la totalidad de elementos que se estudia.

Tamaño de muestra: Se refiere al número de elementos de una selección elegida y que representan a la población total.

En la siguiente formula se muestran la explicación de la fórmula para el cálculo

$$\text{Tamaño de la muestra} = \frac{\frac{z^2 * p * (1 - p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 * p * (1 - p)}{e^2 * N}\right)} \quad (1)$$

Fuente: es.surveymonkey.es

Donde:

N: Tamaño de la población.

e: Margen de error expresado en decimales

z: Cantidad de desviaciones estándar que una proporción se aleja de la media, 1.96 para un nivel de confianza del 95%.

p: Porcentaje de precisión, 50%

3.1.5 Unidad de análisis.

La unidad de análisis del estudio es la producción diaria de mineral chancado en Toneladas / día. Se considera esta unidad debido a que, en el caso de la empresa analizada, este era un valor aproximadamente constante día a día y sus desviaciones eran analizadas como oportunidades de mejora o para comprobar que se estaban haciendo las cosas correctamente y al final del mes o del año se reflejaba en el logro de las metas de producción. No se realizó el análisis sobre las Toneladas / hora porque un incremento del flujo horario de mineral enviado a chancadora no necesariamente significaba un incremento de la producción debido a la posibilidad de sobrecargar el sistema de producción.

El valor de Toneladas / día proviene de las balanzas de los camiones mineros que llevan mineral a chancadora, estos camiones son los CAT 785D con una capacidad media de 145 Toneladas por viaje, estos camiones son cargados por Palas CAT6040 electrohidráulicas, un Cargador 994K y Excavadoras Hitachi, el aporte de una Pala es de aproximadamente 2200 Toneladas / hora por lo que se requiere una Pala y una excavadora para poder cubrir los requerimientos de Chancado, el mineral es recibido en una Chancadora giratoria 63X75 Thyssenkrupp, luego es transferido por un sistema de fajas transportadoras donde es interpolado el tonelaje de mina con los valores de las balanzas de las fajas transportadoras los cuales tienen una capacidad media de 0.2 Toneladas por metro y una velocidad de 4.2 metros por segundo, los registros son anotados en una base de datos de forma manual por personal dedicado y es en su variación donde se verán los efectos de la implementación. Todo este estudio corresponde a una mina de capital extranjero ubicado en el distrito de Marcona, provincia de Nazca, Departamento de Ica.

3.1.6. Estrategia para la prueba de hipótesis

Debido a que se va a plantear una relación entre la Implementación LSS y sus efectos en la producción de mina y la planta debiéndose observar un incremento de

producción en chancadora, se realizara una comparación entre la data generadas antes de la implementación y las implementaciones sucesivas.

Se establecerá como hipótesis nula, que la media de la población con la implementación es igual a la media de la población antes de la implementación y la hipótesis alternativa es que la media de la población con la implementación es mayor que la media de la población sin la implementación.

La validación o rechazo de la hipótesis se hará a través de la comparación de medias utilizando la prueba T de una cola antes, después de la implementación y en las implementaciones sucesivas, considerando que la media de producción diaria, se incrementa con las implementaciones.

Nuestra hipótesis sostiene que la media de nuestra variable dependiente: producción diaria se incrementara al manipular la variable independiente producción mina y planta a través de la variable mediadora: implementación LSS. Para plantear la hipótesis se buscó referencias en implementaciones previas en minería donde se aplicaron parcialmente este concepto, también se consideró la aplicación de la metodología LSS en otras actividades industriales como la industria química o manufacturera donde se tuvieron resultados favorables.

Las características de nuestra hipótesis son:

Es real, está enfocada en una mejora real que se está implementando en la Ampliación Mina Marcona

Las variables son comprensibles: implementación LSS, Producción Mina y Planta e Incremento de Producción.

La relación entre las variables es clara y lógica: se hace implementación y se incrementa la producción, no se hace no se incrementa.

Las variables son observables y medibles: implementación y toneladas producidas

Se tienen técnicas disponibles para comprobar el resultado: técnica t student.

Las variables son:

Variable independiente: Implementación LSS, es una variable binaria con 2 posibles opciones (implementación y no implementación). LSS es una metodología de mejora de procesos, nuestra variable binaria es Implementación LSS con 2 valores: implementación o no implementación.

Variable dependiente: Incremento de Producción en toneladas / día, la cual estará variando en función de la variable independiente. Esta variable es el flujo de mineral que está procesando la chancadora en un día de producción.

Variable mediadora: De 2 valores posibles: Implementación y No implementación
Para analizar la relación o efecto de las variable independiente, dependiente y mediadora, se revisarán los registros de producción diario, los registros serán nuestra forma de medir la variación de la producción y constituyen la definición operacional.

3.2 Procesamiento de la información.

A continuación, se presentará el análisis estadístico de la información registrada con el apoyo de la herramienta informática de Microsoft Office Excel.

3.2.1. Análisis estadístico descriptivo

En la Tabla 7 se realiza el análisis estadístico de la información registrada antes de la primera implementación usando la herramienta de análisis de Excel.

Tabla 7

Análisis Estadístico Descriptivo de data antes de la primera implementación, fuente: Herramienta de Análisis de Datos de Estadística descriptiva

Análisis estadístico antes de implementación	
Media	39535
Error típico	238
Mediana	39685
Moda	40740
Desviación estándar	2045
Varianza de la muestra	4180336
Curtosis	0
Coefficiente de asimetría	0
Rango	8853
Mínimo	35121
Máximo	43974
Suma	2925571
Cuenta	74

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se muestra el cálculo del número de clases usando la fórmula de Sturges.

Tabla 8

Cálculo de Clases usando fórmula de Sturges para los datos antes de la primera implementación.

. =CUARTIL(RANGO;0)	35121	VALOR MÍNIMO
. =CUARTIL(RANGO;1)	38118	1ER CUARTIL
. =CUARTIL(RANGO;2)	39685	MEDIANA
. =CUARTIL(RANGO;3)	40806	3ER CUARTIL
. =CUARTIL(RANGO;4)	43974	VALOR MÁXIMO
RANGO	Vmax - V min	8853
NÚMERO DE INTERVALOS	. =1+3.322*LOG(74)	7.2
TAMAÑO DE CLASE	. =RANGO/80	1106.6563

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9 se muestra el cálculo del número de clases antes de la primera implementación.

Tabla 9

Cálculo de frecuencias de clases de data antes de la primera implementación.

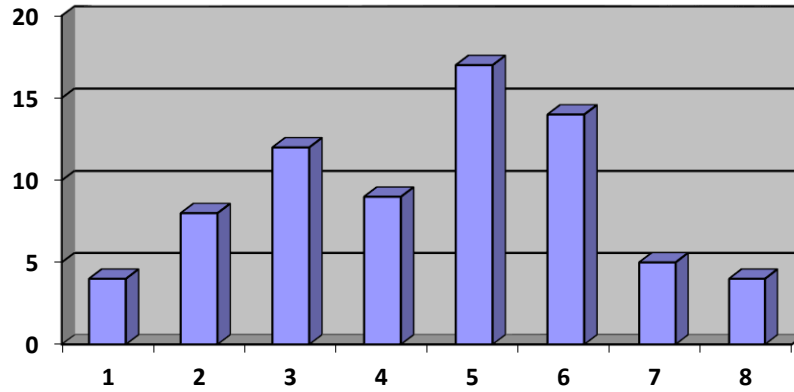
INTERVALOS			
	V min	V max	FRECUENCIA
1	35,121	36,228	4
2	36,228	37,334	8
3	37,334	38,441	12
4	38,441	39,548	9
5	39,548	40,654	17
6	40,654	41,761	14
7	41,761	42,868	5
8	42,868	43,974	4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 13 se muestra el histograma de datos de producción antes de la implementación.

Figura 13

Histograma de datos de producción antes de implementación



Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 10 presentamos los resultados de los valores obtenidos después de la primera implementación reducción de la sobrecarga.

Tabla 10

Análisis Estadístico Descriptivo de data después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.

REDUCCIÓN DE LA SOBRECARGA	
Media	44353.7027
Error típico	218.8664257
Mediana	44369
Moda	45890
Desviación estándar	1882.760184
Varianza de la muestra	3544785.91
Curtosis	0.638472943
Coeficiente de asimetría	-0.09263451
Rango	9674
Mínimo	39650
Máximo	49324
Suma	3282174
Cuenta	74

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 11 muestra el cálculo de clases luego de la 1° implementación.

Tabla 11

Cálculo de Clases usando fórmula de Sturges para los datos después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.

$.=CUARTIL(RANGO;0)$	39650	VALOR MINIMO
$.=CUARTIL(RANGO;1)$	43229.25	1ER CUARTIL
$.=CUARTIL(RANGO;2)$	44369	MEDIANA
$.=CUARTIL(RANGO;3)$	45369.25	3ER CUARTIL
$.=CUARTIL(RANGO;4)$	49324	VALOR MAXIMO
RANGO	$V_{max} - V_{min}$	9674
NÚMERO DE INTERVALOS	$.=1+3.322*LOG(74)$	7.209587773
TAMAÑO DE CLASE	$.=RANGO/8$	1209.25

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 12 se presenta el cálculo de la frecuencia de clases después de la primera implementación.

Tabla 12

Cálculo de frecuencias de clases de data después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.

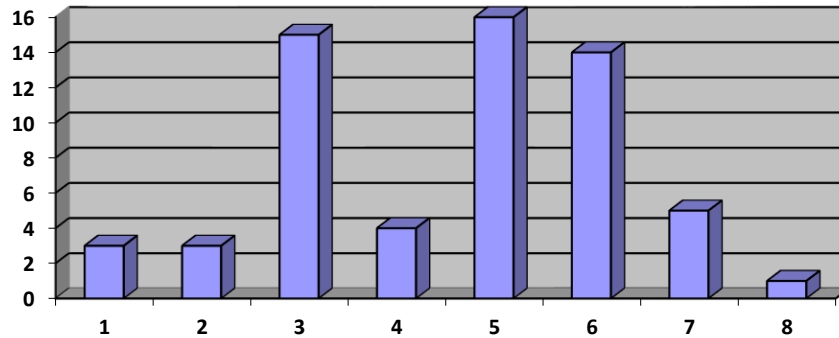
INTERVALOS			
	Vmin	Vmax	Frecuencia
1	39650	40859.25	3
2	40859.25	42068.5	3
3	42068.5	43277.75	15
4	43277.75	44487	4
5	44487	45696.25	16
6	45696.25	46905.5	14
7	46905.5	48114.75	5
8	48114.75	49324	1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 se muestra el histograma de datos de producción después de la primera implementación.

Figura 14

Histograma de datos de producción después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 13 seguimos con los resultados de los valores obtenidos después de la segunda implementación: reducción de la variabilidad.

Tabla 13

Análisis Estadístico Descriptivo de data después de la segunda implementación: reducción de la variabilidad.

REDUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD	
Media	45180.97297
Error típico	175.6620881
Mediana	45290
Moda	46224
Desviación estándar	1511.102419
Varianza de la muestra	2283430.52
Curtosis	-0.947508892
Coficiente de asimetría	-0.151709847
Rango	5720
Mínimo	42170
Máximo	47890
Sum	3343392
Cuenta	74

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 14 se muestra el cálculo de clases después de la segunda implementación: reducción de la variabilidad.

Tabla 14

Cálculo de Clases usando fórmula de Sturges para los datos después de la segunda implementación reducción de la variabilidad.

$.=CUARTIL(RANGO;0)$	42170	VALOR MINIMO
$.=CUARTIL(RANGO;1)$	44039	1ER CUARTIL
$.=CUARTIL(RANGO;2)$	45290	MEDIANA
$.=CUARTIL(RANGO;3)$	46309.5	3ER CUARTIL
$.=CUARTIL(RANGO;4)$	47890	VALOR MAXIMO
RANGO	$V_{max} - V_{min}$	5720
NUMERO DE INTERVALOS	$.=1+3.322*LOG(74)$	7.209587773
TAMAÑO DE CLASE	$.=RANGO/8$	715

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15 se muestra el cálculo de la frecuencia de clases después de la segunda implementación.

Tabla 15

Cálculo de frecuencias de clases de data después de la segunda implementación reducción de la variabilidad

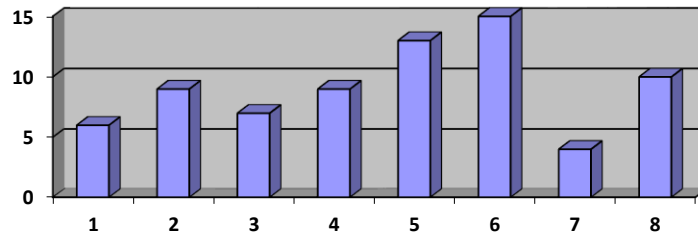
INTERVALOS			
	Vmin	V max	Frecuencia
1	42170	42885	6
2	42885	43600	9
3	43600	44315	7
4	44315	45030	9
5	45030	45745	13
6	45745	46460	15
7	46460	47175	4
8	47175	47890	10

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 15 se muestra el histograma de datos de producción después de la segunda implementación.

Figura 15

Histograma de datos de producción después de la segunda implementación reducción de la variabilidad.



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 16 se presentan los resultados de los valores obtenidos después de la tercera implementación reducción y / o eliminación de pérdidas.

Tabla 16

Análisis Estadístico Descriptivo de data después de la tercera implementación reducción y/o eliminación de pérdidas.

REDUCCIÓN Y/O ELIMINACIÓN DE DESPERDICIOS	
Media	46995.25676
Error típico	149.5211152
Mediana	47044.5
Moda	46885
Desviación estándar	1286.229267
Varianza de la muestra	1654385.728
Curtosis	0.127483991
Coefficiente de asimetría	-0.24760122
Rango	6140
Mínimo	43448
Máximo	49588
Suma	3477649
Cuenta	74

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 17 se muestra el cálculo de clases después de la tercera implantación.

Tabla 17

Cálculo de Clases usando fórmula de Sturges para los datos después de la tercera implementación reducción y / o eliminación de pérdidas.

$.=CUARTIL(RANGO;0)$	43448	VALOR MINIMO
$.=CUARTIL(RANGO;1)$	46294.5	1ER CUARTIL
$.=CUARTIL(RANGO;2)$	47044.5	MEDIANA
$.=CUARTIL(RANGO;3)$	47812	3ER CUARTIL
$.=CUARTIL(RANGO;4)$	49588	VALOR MAXIMO
RANGO	$V_{max} - V_{min}$	6140
NUMERO DE INTERVALOS	$.=1+3.322*LOG(74)$	7.209588
TAMAÑO DE CLASE	$.=RANGO/8$	767.5

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 18 se muestra el cálculo de la frecuencia de clases después de la tercera implementación.

Tabla 18

Cálculo de frecuencias de clases de data después de la tercera implementación reducción y/o eliminación de pérdidas.

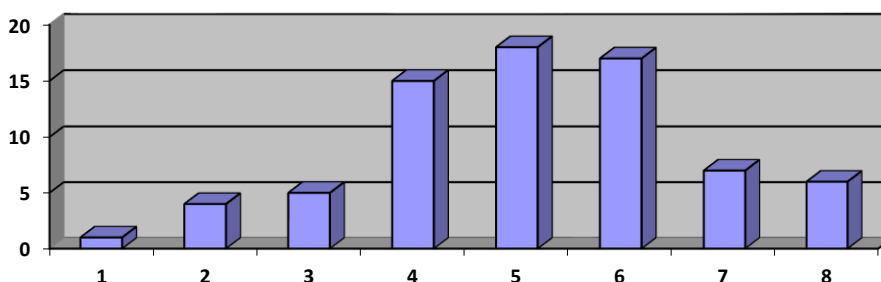
INTERVALOS			
	Vmin	V max	Frecuencia
1	43448	44215.5	1
2	44215.5	44983	4
3	44983	45750.5	5
4	45750.5	46518	15
5	46518	47285.5	18
6	47285.5	48053	17
7	48053	48820.5	7
8	48820.5	49588	6

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 16 se muestra el histograma de datos después de la tercera implementación.

Figura 16

Histograma de datos de producción después de la tercera implementación reducción y/o eliminación de pérdidas.



Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Análisis de atípicos

En esta parte se presenta el hallazgo de atípicos de cada muestra, los cuales definimos como los valores que se encuentran en los siguientes rangos:

En la Tabla 19 se muestra la fórmula para el cálculo de los atípicos antes de la primera implementación.

Tabla 19

Fórmula para cálculo de atípicos

$$\begin{aligned} & \text{ATÍPICOS} < Q1 - 1.5(Q3-Q1) \\ & \text{ATÍPICOS} > Q3 + 1.5(Q3-Q1) \end{aligned}$$

Fuente: Elaboración propia

Siendo Q1 y Q3 los valores que dividen el primero del segundo cuartil y tercero del cuarto cuartil. Para los datos muestreados antes de la primera implementación se calculan los atípicos.

En la Tabla 20 se presenta la cuenta de datos de atípicos antes de la primera implementación.

Tabla 20

Cuenta de datos atípicos antes de la primera implementación.

CÁLCULO DE ATÍPICOS	
Q1 - 1.5(Q3-Q1)	34085
Q3 + 1.5(Q3-Q1)	44839
=CONTAR.SI(RANGO;"<34085")	0
=CONTAR.SI(RANGO;">44839")	0
DATOS ATÍPICOS	0

Fuente: Elaboración propia

No se tienen datos atípicos antes de la primera implementación. Haremos el análisis de atípicos por cada implementación. Después de la primera implementación reducción de la sobrecarga, se calculan los cuartiles y se hace la búsqueda de atípicos:

La Tabla 21 presenta los datos atípicos luego de la 1ª. implementación.

Tabla 21

Cuenta de datos atípicos después de la primera implementación reducción de la sobrecarga.

CÁLCULO DE ATÍPICOS	
Q1 - 1.5(Q3-Q1)	40019.25
Q3 + 1.5(Q3-Q1)	48579.25
=CONTAR.SI(RANGO; "<40019.25")	3
=CONTAR.SI(RANGO; ">48579.25")	2
DATOS ATÍPICOS	5

Fuente: Elaboración propia

El análisis de datos atípicos para los datos de la segunda implementación, reducción de la variabilidad, comenzando por el cálculo de los cuartiles y seguido por el número de atípicos.

En la Tabla 22 se presenta la cuenta de datos atípicos después de la segunda implementación.

Tabla 22

Cuenta de datos atípicos después de la segunda implementación reducción de la variabilidad.

CÁLCULO DE ATÍPICOS	
Q1 - 1.5(Q3-Q1)	40633.25
Q3 + 1.5(Q3-Q1)	49715.25
=CONTAR.SI(RANGO; "< 40633.255")	0
=CONTAR.SI(RANGO; "> 49715.25")	0
DATOS ATÍPICOS	0

Fuente: Elaboración propia

Para los datos de la tercera implementación, reducción y/ o eliminación de pérdidas, se calculan los cuartiles y el número de atípicos.

En la Tabla 23 se muestra la cuenta de los datos atípicos después de la tercera implementación.

Tabla 23

Cuenta de datos atípicos después de la tercera implementación reducción y / o eliminación de pérdidas.

CÁLCULO DE ATÍPICOS	
Q1-1.5(Q3-Q1)	44018.25
Q3+1.5(Q3-Q1)	50088.25
.=CONTAR.SI(RANGO;"<40633.25")	1
.=CONTAR.SI(RANGO;">49715.25")	0
DATOS ATÍPICOS	1

Fuente: Elaboración propia

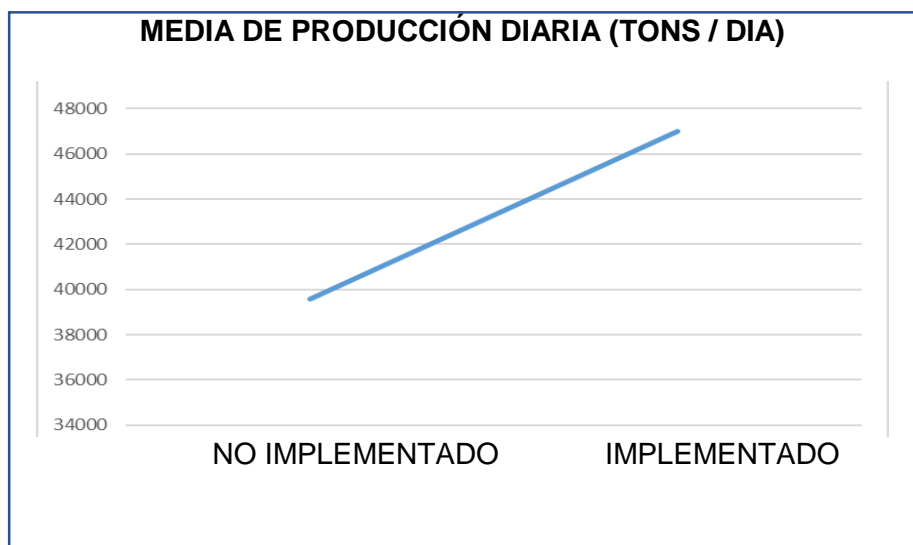
3.2.3. Análisis de correlación

Hacemos un análisis de correlación simple donde se muestra las condiciones de la media de la producción antes de la implementación y luego de la culminación de la implementación (aplicación de las medidas para contrarrestar la sobrecarga, la variabilidad y la reducción y / o eliminación de pérdidas).

En la Figura 17 se presenta el análisis de correlación implementación vs la media de tonelaje / día

Figura 17

Análisis de correlación implementación vs media de tonelaje / día.



Fuente: Elaboración propia

De este diagrama se observa que el grado de implementación y las medias de tonelajes diarios de producción están relacionados en forma directa.

3.2.4. Análisis de dispersión entre variables

De la figura anterior se observa que al realizar la implementación se incrementa la media por lo que existe una correlación positiva.

3.2.5. Comprobación de normalidad de todas las variables

Realizamos la comprobación para antes de la primera implementación para verificar que los datos tomados sin implementación se aproximan a una distribución normal, usando la prueba de Kolmogorov Smirnov y la hoja de cálculo de Excel.

En la Tabla 24 se presenta el procesamiento de los datos antes de la primera implementación para la comprobación de la normalidad de las variables.

Tabla 24

Procesamiento de datos antes de la implementación para cálculo de parámetros de Kolmogorov Smirnov.

i	Xi	pi	Zi	P(Zi)	P(Zi)-pi	P(Zi)-pi-1
1	35,121	0.01351	-2.15877	0.01543	0.00192	0.99808
2	35,279	0.02703	-2.08157	0.01869	0.00834	1.00834
3	35,609	0.04054	-1.92015	0.02742	0.01312	1.01312
4	35,719	0.05405	-1.86607	0.03102	0.02303	1.02303
5	36,621	0.06757	-1.4252	0.07705	0.00948	0.99052
6	36,741	0.08108	-1.36657	0.08588	0.0048	0.9952
7	36,932	0.09459	-1.27285	0.10154	0.00695	0.99305
8	36,972	0.10811	-1.25361	0.10499	0.00312	1.00312
9	37,005	0.12162	-1.2373	0.10799	0.01363	1.01363
10	37,080	0.13514	-1.2006	0.11495	0.02019	1.02019
11	37,240	0.14865	-1.12245	0.13084	0.01781	1.01781
12	37,298	0.16216	-1.09405	0.13697	0.02519	1.02519
13	37,387	0.17568	-1.05031	0.14679	0.02889	1.02889
14	37,464	0.18919	-1.0127	0.1556	0.03359	1.03359
15	37,555	0.2027	-0.96813	0.16649	0.03621	1.03621
16	37,727	0.21622	-0.88419	0.1883	0.02792	1.02792
17	37,934	0.22973	-0.78289	0.21685	0.01288	1.01288
18	38,065	0.24324	-0.71894	0.23609	0.00715	1.00715
19	38,102	0.25676	-0.70089	0.24169	0.01507	1.01507
20	38,166	0.27027	-0.66963	0.25155	0.01872	1.01872

21	38,320	0.28378	-0.59413	0.27621	0.00757	1.00757
22	38,364	0.2973	-0.57255	0.28348	0.01382	1.01382
23	38,378	0.31081	-0.56556	0.28348	0.02733	1.02733
24	38,418	0.32432	-0.54642	0.29239	0.03193	1.03193
25	38,579	0.33784	-0.46731	0.32014	0.0177	1.0177
26	38,683	0.35135	-0.41636	0.33857	0.01278	1.01278
27	38,826	0.36486	-0.34661	0.36444	0.00042	1.00042
28	38,886	0.37838	-0.3173	0.37551	0.00287	1.00287
29	38,917	0.39189	-0.30214	0.38127	0.01062	1.01062
30	39,181	0.40541	-0.17323	0.43123	0.02582	0.97418
31	39,366	0.41892	-0.08241	0.46716	0.04824	0.95176
32	39,418	0.43243	-0.05692	0.4773	0.04487	0.95513
33	39,496	0.44595	-0.01904	0.4924	0.04645	0.95355
34	39,561	0.45946	0.01298	0.50518	0.04572	0.95428
35	39,667	0.47297	0.06472	0.5258	0.05283	0.94717
36	39,675	0.48649	0.06876	0.52741	0.04092	0.95908
37	39,676	0.5	0.06926	0.52761	0.02761	0.97239
38	39,693	0.51351	0.0776	0.53093	0.01742	0.98258
39	39,701	0.52703	0.08115	0.53234	0.00531	0.99469
40	39,706	0.54054	0.08395	0.53345	0.00709	1.00709
41	39,707	0.55405	0.08404	0.53349	0.02056	1.02056
42	39,802	0.56757	0.13055	0.55194	0.01563	1.01563
43	39,810	0.58108	0.13479	0.55361	0.02747	1.02747
44	39,914	0.59459	0.1856	0.57362	0.02097	1.02097
45	39,981	0.60811	0.2183	0.5864	0.02171	1.02171
46	39,995	0.62162	0.22512	0.58906	0.03256	1.03256
47	40,009	0.63514	0.23178	0.59164	0.0435	1.0435
48	40,113	0.64865	0.28266	0.61128	0.03737	1.03737
49	40,240	0.66216	0.34494	0.63493	0.02723	1.02723
50	40,342	0.67568	0.39507	0.6536	0.02208	1.02208
51	40,662	0.68919	0.55129	0.70928	0.02009	0.97991
52	40,673	0.7027	0.55675	0.71115	0.00845	0.99155
53	40,740	0.71622	0.58937	0.72219	0.00597	0.99403
54	40,740	0.72973	0.58937	0.72219	0.00754	1.00754
55	40,770	0.74324	0.60439	0.72721	0.01603	1.01603
56	40,818	0.75676	0.62783	0.73494	0.02182	1.02182
57	40,820	0.77027	0.62842	0.73513	0.03514	1.03514
58	41,050	0.78378	0.74097	0.77064	0.01314	1.01314
59	41,132	0.7973	0.78106	0.78262	0.01468	1.01468
60	41,160	0.81081	0.79489	0.78666	0.02415	1.02415
61	41,190	0.82432	0.8094	0.79086	0.03346	1.03346
62	41,449	0.83784	0.9362	0.82541	0.01243	1.01243
63	41,587	0.85135	1.00372	0.84224	0.00911	1.00911

64	41,670	0.86486	1.04457	0.85189	0.01297	1.01297
65	41,771	0.87838	1.09362	0.86294	0.01544	1.01544
66	42,145	0.89189	1.27679	0.89916	0.00727	0.99273
67	42,197	0.90541	1.30191	0.90353	0.00188	1.00188
68	42,281	0.91892	1.34315	0.91039	0.00853	1.00853
69	42,837	0.93243	1.61515	0.94686	0.01443	0.98557
70	42,961	0.94595	1.67575	0.95311	0.00716	0.99284
71	42,970	0.95946	1.67994	0.95352	0.00594	1.00594
72	43,633	0.97297	2.004468	0.9775	0.00453	0.99547
73	43,900	0.98649	2.13501	0.098362	0.888128	1.888128
74	43,974	1	2.17132	0.98505	0.01495	1.01495

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 25 se realiza el cálculo de los parámetros antes de la primera implementación para la comprobación de la normalidad.

Tabla 25

Cálculo de parámetros de Kolmogorov Smirnov antes de la implementación.

X	39,535		
S	2,045		
KSc	0.066342757		
α	0.1	0.05	0.01
C α	0.819	0.895	1.035
K(n)	8.69113576	8.69113576	8.69113576
KSt	0.102978486		

Fuente: Elaboración propia

El parámetro p toma como valor 0.102978486 que es mayor que el nivel de significancia 0.05 por lo que podemos decir que el conjunto de datos tiene una distribución aproximadamente normal, como queda graficada en la distribución de frecuencias.

Haciendo un análisis similar para la finalización de las implementaciones en la Tabla 26 se presenta el procesamiento de datos con la implementación realizada:

Tabla 26

Procesamiento de datos finalizada la implementación para cálculo de parámetros de Kolmogorov Smirnov.

i	Xi	pi	Zi	P(Zi)	P(Zi)-pi	P(Zi)-pi-1
1	43,448	0.1351	-3.09682	0.00097803	0.01254	0.0125355
2	44,337	0.02703	-2.32071	0.01015128	0.01688	0.033622
3	44,367	0.04054	-2.29452	0.01088037	0.02966	0.0161467

4	44,395	0.05405	-2.27007	0.02260155	0.04245	0.028939
5	44,660	0.6757	-2.03872	0.0207388	0.04683	0.0333153
6	45,317	0.08108	-1.46515	0.07143996	0.00964	0.0038724
7	45,337	0.09459	-1.44769	0.0738519	0.0274	0.0072292
8	45,337	0.10811	-1.44769	0.0738519	0.03426	0.0207427
9	45,359	0.12162	-1.42848	0.0738519	0.03426	0.0207427
10	45,409	0.13514	-1.38483	0.08305185	0.05208	0.03856698
11	45,790	0.14865	-1.05221	0.1463511	0.0023	0.011216
12	45,799	0.16216	-1.04436	0.14816058	0.014	0.0004881
13	45,870	0.17568	-0.98237	0.16295863	0.01272	0.0007965
14	45,956	0.18919	-0.90729	0.18212646	0.00706	0.0064508
15	45,994	0.2027	-0.87412	0.19102746	0.01168	0.0018383
16	46,228	0.21622	-0.66983	0.25148314	0.03527	0.0487804
17	46,228	0.22973	-0.66983	0.25148314	0.02175	0.0352669
18	46,269	0.24324	-0.63404	0.26302865	0.01979	0.0332989
19	46,280	0.25676	-0.62443	0.26617168	0.00841	0.0229284
20	46,338	0.27027	-0.5738	0.28305234	0.01278	0.0262956
21	46,378	0.28378	-0.53888	0.29498588	0.0112	0.0247156
22	46,380	0.2973	-0.53713	0.29558859	0.00171	0.0118048
23	46,385	0.31081	-0.53277	0.29709785	0.01371	0.0001995
24	46,395	0.32432	-0.52404	0.30012688	0.0242	0.0106839
25	46,439	0.33784	-0.48562	0.31361732	0.02422	0.010707
26	46,547	0.35135	-0.39134	0.34777418	0.00358	0.0099363
27	46,580	0.36486	-0.36253	0.35847909	0.00639	0.0071277
28	46,586	0.37838	-0.35729	0.36043774	0.01794	0.0044271
29	46,614	0.39189	-0.33284	0.36962585	0.02227	0.0087525
30	46,750	0.40541	-0.21411	0.41522914	0.00982	0.0233372
31	46,792	0.41892	-0.17745	0.42957863	0.01066	0.0241732
32	46,794	0.43243	-0.1757	0.43026442	0.00217	0.0113455
33	46,870	0.44595	-0.10935	0.45646183	0.01052	0.0240294
34	46,885	0.45946	-0.09626	0.46165853	0.0022	0.0157126
35	46,885	0.47297	-0.09626	0.46165853	0.01131	0.0021991
36	46,995	0.48649	-0.00022	0.49991058	0.01342	0.0269376
37	46,996	0.5	0.00065	0.50025886	0.00026	0.0137724
38	47,093	0.51351	0.08533	0.53400116	0.02049	0.0340012
39	47,134	0.52703	0.12113	0.54820419	0.02118	0.0346907
40	47,136	0.54054	0.12287	0.54889559	0.00836	0.0218686
41	47,226	0.55405	0.20144	0.57982401	0.02577	0.0392835
42	47,249	0.56757	0.22152	0.58765727	0.02009	0.0336032
43	47,256	0.58108	0.22763	0.59003455	0.00895	0.022467
44	47,330	0.59459	0.29224	0.61494739	0.02035	0.0338663
45	47,330	0.60811	0.29224	0.61494739	0.00684	0.0203528
46	47,335	0.62162	0.2966	0.61661494	0.00501	0.0085068

47	47,336	0.63514	0.29748	0.6169482	0.01819	0.0046734
48	47,360	0.64865	0.31843	0.62491978	0.02373	0.0102154
49	47,380	0.66216	0.33589	0.63152242	0.03064	0.0171262
50	47,440	0.67568	0.38827	0.65109165	0.02458	0.0110705
51	47,460	0.68919	0.40573	0.65752941	0.03166	0.0181463
52	47,550	0.7027	0.4843	0.68591403	0.01679	0.0032752
53	47,559	0.71622	0.49216	0.6886964	0.02752	0.0140063
54	47,637	0.72973	0.56025	0.7123447	0.01738	0.038693
55	47,698	0.74324	0.61351	0.73022985	0.01301	0.0005001
56	47,850	0.75676	0.74621	0.77222887	0.01547	0.0289856
57	47,885	0.77027	0.77676	0.78135066	0.01108	0.0245939
58	47,890	0.78378	0.78113	0.78263638	0.00115	0.0123661
59	47,936	0.7973	0.82129	0.79425855	0.00304	0.0104748
60	47,980	0.81081	0.8597	0.8050227	0.00579	0.0077254
61	48,247	0.82432	1.0928	0.86275827	0.03843	0.0519475
62	48,336	0.83784	1.17049	0.87909899	0.04126	0.0547747
63	48,336	0.85135	1.17049	0.87909899	0.02775	0.0412612
64	48,359	0.86486	1.19057	0.88308956	0.01822	0.0317382
65	48,395	0.87838	1.222	0.88914668	0.01077	0.0242818
66	48,660	0.89189	1.45335	0.92693	0.03505	0.0485587
67	48,670	0.90541	1.46208	0.92814075	0.02274	0.0362489
68	48,932	0.91892	1.69081	0.95456383	0.03564	0.0491584
69	48,996	0.93243	1.74669	0.95965419	0.02722	0.0407353
70	49,056	0.94595	1.79907	0.96399606	0.01805	0.0315636
71	49,336	0.95946	2.04351	0.97949919	0.02004	0.0335532
72	49,339	0.97297	2.04613	0.97962834	0.00666	0.0201689
73	49,360	0.98649	2.06447	0.98051323	0.00597	0.0075403
74	49,588	1	2.26351	0.988198	0.0118	0.0017115

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 27, se presenta el cálculo de los parámetros Kolmogorov-Smirnov después de la implementación.

Tabla 27

Cálculo de parámetros de después de la implementación.

X	46,995		
S	1,145		
KS c	0.054775		
α	0.1	0.05	0.01
$C\alpha$	0.819	0.895	1.035
K(n)	8.691136	8.691136	8.691136
KS t	0.102978		

Fuente: Elaboración propia

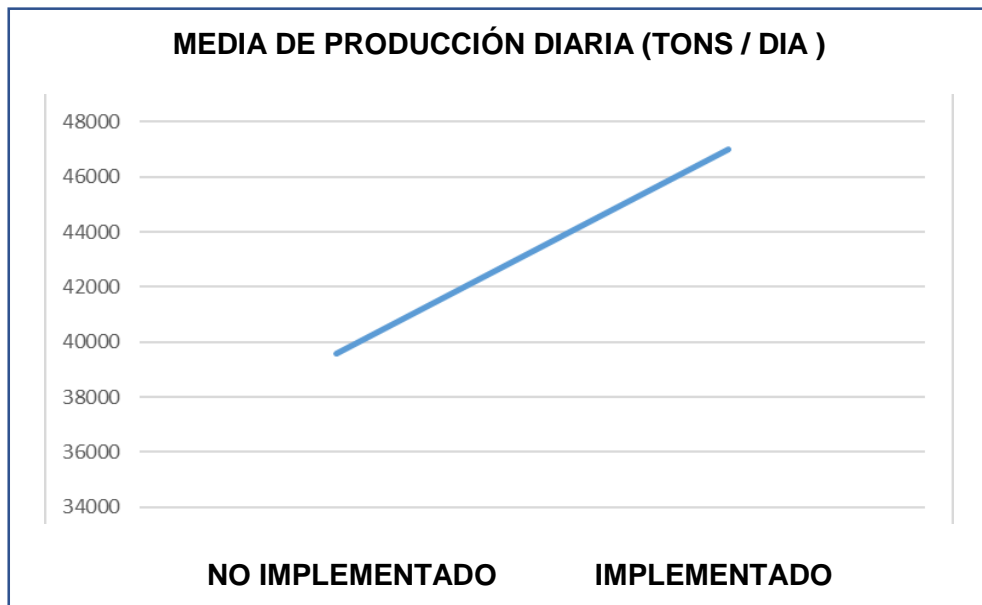
El parámetro p toma como valor 0.10298 que es mayor que el nivel de significancia 0.05 por lo que podemos decir que el conjunto de datos de la implementación completa tiene una distribución normal, como queda graficada en la distribución de frecuencias.

3.2.6. Comprobación de linealidad entre variables

En este caso se analiza la variable independiente como binaria es decir toma 2 valores: no implementación e implementación. En la Figura 18 se muestra la gráfica de relación de linealidad entre variables.

Figura 18

Linealidad entre variables



Fuente: Elaboración propia

Se observa que la variación de la variable independiente toma valores cualitativos, donde podemos hacer un modelo como el siguiente:

$$\text{Producción} = B_0 + B_1 (\text{Implementación LSS}) + E_1$$

Donde B_0 toma el valor de la media antes de la implementación que es 39,524, B_1 toma el valor de incremento conseguido al final de la implementación 7,471, e implementación toma los valores 0 y 1 y hacemos E_1 igual a 0. Quedando el modelo de la siguiente manera:

$$\text{Producción} = 39,524 + 7,471(\text{Implementación LSS})$$

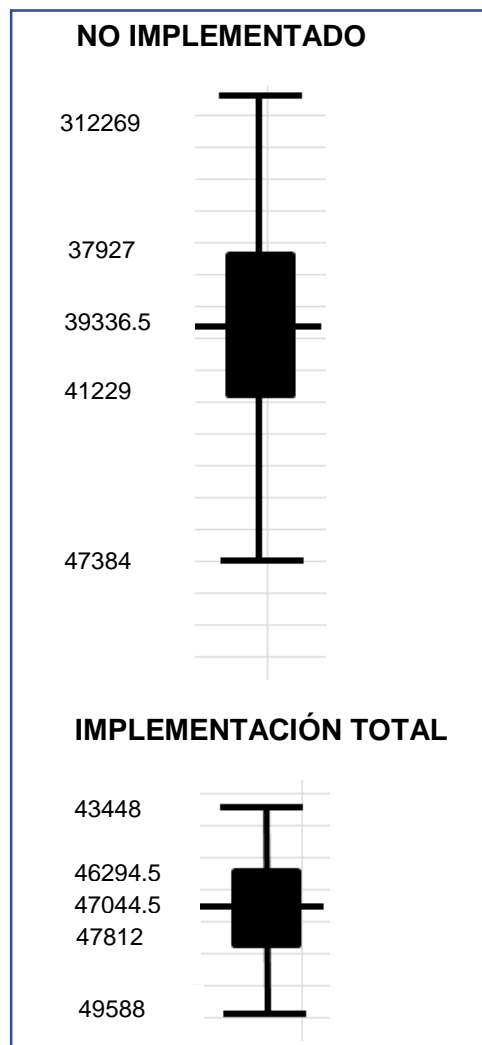
Esta fórmula corresponde a una línea recta.

3.2.7. Homocedasticidad de las varianzas de datos agrupados

Realizando el diagrama de cajas y bigotes observamos que las varianzas antes de la implementación y después de la implementación completa **no son iguales** habiéndose reducido la variabilidad. En la Figura 19 se muestran los diagramas de cajas antes y después de la implementación.

Figura 19

Diagrama de cajas.



Fuente: Elaboración propia

3.2.8 Relación entre variables independientes

Solo se cuenta con una variable independiente que toma 2 valores por lo que no hay relación con otra variable independiente.

3.3 Obtención de resultados

Para hacer este estudio se buscó la calidad de los datos recopilados, así se tomó muestras de la producción diaria la cual se venían registrando antes de hacer la implementación y se tuvo el cuidado de no informar al personal involucrado en la generación de los mismos que estaban siendo parte de este análisis.

Todas las muestras fueron registradas al finalizar el día de producción, tomando como dato la producción diaria (Tons / día). El personal encargado de tomar los registros estaba familiarizado con el trabajo de toma de datos sin ser informado del análisis.

La empresa tenía antes de la implementación un registro de producción diario donde la información era ingresada.

Para la base de datos de producción y el análisis de datos se utilizó la herramienta informática Excel, así como una aplicación web para determinar el tamaño de la muestra en función del tamaño de la población.

Para la verificación de la hipótesis y en cada paso de implementación se utilizaron hipótesis semejantes:

H_0 : La media de la producción diaria antes de la implementación es igual a la media con la implementación dada.

La hipótesis alterna para cada implementación:

H_1 : La media de la producción diaria con la implementación es mayor a la media de la producción diaria antes de la implementación.

Haciendo el análisis de datos correspondiente para cada implementación se rechazó cada hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa, verificando que la media de la producción diaria se incrementaba con cada paso hasta finalizar la implementación.

Así antes de la implementación se obtuvo como media de datos de producción diaria el valor de 39 535 Tons / día, luego al realizar la primera implementación, reducción de la sobrecarga se obtuvo un valor de media de producción diaria de 44 353 Tons / día. El siguiente paso fue la implementación de la reducción de la variabilidad, la cual nos dio como resultado el incremento de la media de producción diaria a 45 181 Tons / día. Y

finalmente se concluyó con la reducción y/o eliminación de pérdidas obteniéndose una media de 46 995 tons / día.

Los valores de la media de la producción diaria de mineral se han incrementado conforme se ha realizado cada implementación, antes de la primera implementación se tenía una media de producción diaria de 39 535 tons / día, con la primera implementación reducción de la sobrecarga se logró una media de producción de 44 354 tons / día, al realizar la segunda implementación, reducción de la variabilidad se logró una media de 45 181 tons / día, y finalmente con la implementación completa añadiendo la reducción y / o eliminación de pérdidas se logró una media de producción diaria de 46 995 tons / día, por lo que podemos aceptar las hipótesis alternativas en cada paso de la implementación y también la hipótesis principal de la investigación concluyendo que efectivamente la implementación de la metodología Lean Six Sigma ha permitido incrementar la producción diaria de mineral enviado a Chancadora.

En la primera parte de la implementación nos puede parecer extraño que habiendo reducido la producción horaria (Tons / hr) de 3000 tons / hr a 2700 tons / hr, se logre una mayor producción diaria de mineral chancado, pero esto se explica por las limitantes encontradas al intentar producir a este tonelaje:

- La faja 014003 tenía una longitud de 8.7 Km, pero tenía problemas de subdimensionamiento de los empalmes, la norma técnica recomendaba empalmes de 2.9 metros, pero el tamaño real encontrado en campo era de 2 metros, constando la faja de 50 empalmes se produjeron varios eventos de rotura de faja al intentar producir a mayor tonelaje horario.
- Los chutes de intercambio de fajas sufrían continuos atoros al intentar incrementar la producción horaria.
- La planta de zaranda tenía componentes que presentaban desgaste prematuro al incrementar el tonelaje, lo cual originaban más paradas de planta no programadas por reparación no planificada.

Se evidenciaban problemas de diseño que no permitían incrementar el tonelaje horario, los cuales obligaron a reducir este mismo para tener mayor disponibilidad operativa de la planta.

Antes de la reducción de la variabilidad se presentaban los siguientes problemas en la planta:

- Se hacía chancado y transferencia por fajas de mineral que no cumplía las especificaciones requeridas para su entrega a planta beneficio.
- Atoros por material sobredimensionado en los chutes de intercambio de material entre fajas.
- Recirculación de mineral entre las plantas de zarandas banana y chancadora secundaria.
- Desgaste prematuro de componentes de plantas por exposición de mineral de gran tamaño.

Con la implementación de la voladura electrónica y el apoyo del análisis de fragmentación por parte del proveedor de detonadores electrónicos se ajustaron los parámetros de voladura para lograr una fragmentación acorde a las especificaciones. Esta mejora permitió reducir los eventos de atoro de chutes, menor desgaste de blindajes y mayor vida útil con la reducción de tiempos de parada para mantenimientos de planta con el consiguiente incremento de la disponibilidad operativa.

La eliminación de pérdidas estaba asociada a paradas innecesarias de la planta. Se fijó como objetivo incrementar el tiempo operativo para ello se analizaron los siguientes problemas:

- Paradas de planta no programadas por problemas mecánicos y eléctricos en planta.
- Intervenciones de reparación de planta donde no se hacían trabajos simultáneos para reducir los tiempos de parada por poca disponibilidad de personal mecánico.

- No existían planes de mantenimiento preventivo.
- Tiempos muertos por cambios de turno, refrigerios, traslados de personal, incidentes operativos, comunicación.
- Cada problema fue analizado, tomándose las medidas respectivas para reducir o eliminar su impacto en la producción de la operación.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

Para realizar el análisis se considera en primer lugar como se desarrolló el proceso de implementación del Lean Six Sigma, donde se considera los recursos disponibles, para ello se definió trabajar en 3 pasos usando la teoría general de la metodología. La teoría nos enseña que se deben trabajar 3 aspectos fundamentales los cuales son: la sobrecarga, la variabilidad y la eliminación o reducción de las pérdidas. La aplicación de cada uno de estos aspectos a la realidad de la mina se explicará en los siguientes párrafos.

4.1 Implementación de Lean Six Sigma

4.1.1 Desarrollo de la implementación

Se consideró la implementación de la metodología en 3 etapas para cada uno de los aspectos fundamentales de la teoría, considerándose analizar primero la sobrecarga del sistema considerando que el flujo de mineral transferido por la planta en **Tons / hr** era excesivo y que una reducción de este permitiría lograr mayor producción diaria de mineral en **Toneladas / día** , en base a las opiniones del personal operativo y mecánico, considerando también la información disponible de ingeniería del proyecto, seguidamente se analizara la variabilidad considerando que el rango de fragmentación del mineral entregado era muy amplio y variable, y también este factor afectaba la producción diaria en **Tons / día**, y finalmente la reducción/ eliminación de pérdidas considerando que reducir los tiempos perdidos de producción permitiría incrementar las **Tons / día** procesadas de mineral.

4.1.1.1 Implementación en mina. Estando el presente trabajo enfocado en la zona nueva de Ampliación Mina Marcona, detallamos las características de esta. La operación de la mina se encuentra a cargo de un contratista, con un contrato de movimiento de material a un costo US\$/ Ton por distancia promedio, dicho contratista posee una flota de 4 Palas Electrohidráulicas 6040 Cat, 26 camiones Cat 785D con una capacidad de carga promedio de 155 Toneladas, así también posee un Cargador Cat 994K, y equipos auxiliares para trabajos varios de soporte a la producción (motoniveladoras, tractores de

llantas y oruga, excavadoras) y en perforación posee 7 perforadoras: 5 Sandvik 1190E para producción y 2 D245 para precorte.

El abastecimiento de mineral a Chancadora se realiza en carguío con una Pala y sumada a ella una excavadora para mantener un flujo de 2700 Tons / hora, esta excavadora diluye el zinc y pirrotita presentes en la mina que son elementos penalizante en el producto final.

La principal dificultad en la mina y oportunidad de mejora era el mantener un abastecimiento continuo a la chancadora, debido a la baja disponibilidad de la planta, el requerimiento de mineral era discontinuo y obligaba al contratista a realizar cambios continuos de frente del equipo de carguío de mineral a desmonte. Se utilizaba un promedio de 7 camiones para abastecer a la Chancadora. No se contaba con un sistema de control de flota, los camiones trabajaban con asignación fija. Se observa también que, por la capacidad y dimensiones de los equipos, estos pueden cumplir con holgura el abastecimiento a planta.

Otra oportunidad de mejora se encontró en la fragmentación del mineral enviado a Chancadora cuyo factor de fragmentación F80 era mayor al especificado por el diseño de Planta (F80 es el 80% del mineral que ingresa a Chancadora superaba el tamaño diseñado que era 45 cm, el P80% es el 80% del mineral que sale del proceso de Chancado). También había oportunidades de mejora en los tiempos de atención a la solicitud de abastecimiento a Chancadora, cambios de turno de contratistas, Paradas por voladura que se irán analizando en el presente trabajo.

4.1.1.2 Implementación en planta. La planta de la zona nueva inicia con la Chancadora Primaria Thyssenkrupp, Chancadora Giratoria de 3650 Toneladas / hora de capacidad nominal, la cual está restringida por el sistema de fajas transportadoras, las cuales tienen una capacidad de 3050 toneladas / hora, esta planta recibe el mineral abastecido por el contratista de movimiento de tierras cuyo F80 no debe exceder los 45 cm. La chancadora entrega un material con P80 de 17 pulgadas (F80 es el 80% del mineral que ingresa a Chancadora mientras que el P80 es el 80% del mineral que sale del proceso

de Chancado), el cual es transportado por 4 fajas transportadoras que suman 9300 metros de longitud hasta la planta de zarandas. No se cuenta con un stock pile inmediatamente después de la Chancadora por lo que una falla intempestiva corta el flujo de abastecimiento de la planta hasta 15 km aguas debajo de fajas transportadoras y 3 plantas más. Las diferencias de capacidades de las plantas y la dependencia de todas las plantas en serie son una característica de diseño que hace que se tomen consideraciones especiales para trabajar con ella.

Luego de ser transferido el mineral por 4 fajas llega a la Planta de Zarandas donde el mineral es separado a través de la vibración y el tamizado de un par de Zarandas Metso con apertura de 40 mm, el mineral fino se traslada a una faja y a su vez se traslada al punto de apilamiento o stock del paquete 4, el mineral mayor a 40 mm se transfiere por faja a la Planta de Chancado Secundario, donde 3 Chancadoras Secundarias en Paralelo reducen el mineral a 40 mm para ser entregada a las Zarandas Sandvik Bananas, y se posterior tamizado para ir al stock del paquete 4

Antes del apilado hay una torre de intercambio de fajas donde una compuerta diverter desvía el mineral hacia la Planta de Dry Cobbing, esta planta es usada cuando se tienen leyes menores al 50% de Fe, allí mediante poleas magnéticas se realiza la separación del material con bajo contenido de Hierro, y se transfiere por fajas a una tolva con un chute que descarga a un camión el cual a su vez lo traslada a un botadero, la parte enriquecida se transfiere por fajas de retorno al sistema para llegar al stock del paquete 4.

En el Paquete 4 existe un equipo de apilamiento móvil, el Stacker Sandvik, el cual, permite el apilado a lo largo de un área restringido a ambos lados por la faja transportadora del Stacker y la faja transportadora del Bucket Wheel Reclaimer o Rotopala, esta área de apilamiento se denomina el stock del paquete 4 y tiene una capacidad de almacenamiento de 450 000 toneladas de mineral. Esta zona de apilamiento permite hacer mezclas con los materiales de los 3 tajos en operación permitiendo diluir los contenidos de zinc, arsénico (penalizables) y entregar leyes medias de Hierro a la llamada zona húmeda.

En el mismo Paquete 4 se tiene la Rotopala o Bucket Whell Reclaimer marca Sandvik, equipo único en el Perú para el recojo y transferencia de la Pila de Mineral de Hierro hacia otro stock situado a 9 Kilómetros hacia la playa, este stock es el llamado stock de crudos o stock del paquete 6, donde el mineral es apilado y mezclado nuevamente para su posterior envío a Planta beneficio. Este stock tiene una capacidad de 550 000 toneladas de mineral y es a su vez recogido por otro equipo de recojo de mineral llamado Drum Reclaimer, el cual posee un tambor giratorio horizontal que hace un recojo de pila y lo mezcla en su interior para su envío por la última faja de la zona seca hacia la llamada zona húmeda.

La zona húmeda entrega como producto final la torta que es transferida hacia la zona de embarque, donde es cargada a los barcos que tienen como destino el Asia principalmente.

La filosofía del sistema es la continuidad de la transferencia de material desde el Tajo hacia el barco, teniendo un sistema que sumado a la llamada zona antigua consta de aproximadamente 100 km de fajas transportadoras y pilas de almacenamiento que en total están bordeando los 2 000 000 de toneladas de capacidad.

4.1.1.3 Desarrollo de la metodología. Como se ha mencionado, la implementación se realizó en etapas sucesivas comenzando por la sobrecarga, luego la variabilidad y finalizando con la reducción / eliminación de pérdidas.

4.1.1.3.1 Reducción de la sobrecarga. En cuanto al aspecto de sobrecarga para el caso de la planta se observó que se tenía por diseño una capacidad teórica de flujo desde Chancadora Primaria hasta el apilador stacker del paquete 4, de 3050 Tons / hr, la cual nunca se lograba debido a restricciones como fallas de equipos o tolvas llenas de las plantas.

Las fallas recurrentes estaban asociadas a la faja curva 014003, en la cual ocurrían roturas de empalmes y también a las zarandas lineales donde ocurrían fallas importantes como roturas de la estructura principal. También el flujo de 3050 Tons / hr generaba niveles de tolva altos obligando a parar el sistema para bajar dichos niveles.

Ante la insistencia de la dirección se continuaba intentando producir 3050 toneladas / hora sin éxito. Por ello se consideró usar el criterio Lean Six Sigma de eliminación de sobrecarga e intentar transferir mineral a flujos menores considerando que existía una sobrecarga del sistema y comparar los tonelajes diarios antes y después de reducir el flujo. Intuitivamente se percibía que transfiriendo menor flujo por el sistema de fajas y plantas dejarían de ocurrir paradas continuas por desgaste acelerados de componentes de estas plantas, así a pesar de la resistencia de la dirección de insistir con los flujos de 3050 toneladas / hr, se realizaron las pruebas respectivas a un flujo de 2700 toneladas / hr cuyo proceso de obtención de datos y resultados se discutirán más adelante. En el comienzo de la implementación se encontró documentación de la ingeniería de diseño, donde se hicieron observaciones de parámetros críticos de diseño como la diferencia entre la densidad de diseño del material procesado con respecto a lo encontrado en campo.

El efecto del cambio de tonelaje se notará en la producción diaria, la cual se considera más representativa que la producción horaria la cual es afectada por diferentes factores, algunos de menor importancia.

4.1.1.3.2 Reducción de la variabilidad. Luego de haber corroborado el primer paso, se continuó con la reducción de la variabilidad. Para ello se consideró como factor que hacía irregular y variable el proceso, la fragmentación del mineral procesado por la chancadora. Antes del desarrollo de la implementación la entrega de mineral por parte del contratista estaba regulada por un contrato donde solo se restringía, el tamaño de mineral entregado a un tamaño máximo de 100 cm. Haciendo una revisión de documentación solicitada al área de Ingeniería, se sinceraron las condiciones operativas de chancadora considerando efectivamente un tamaño máximo de 100 cm pero adicionalmente se incluyó el requerimiento de $F_{80} = 45$ cm (80% del material debía ser menor a 45 cm) el cual era un requisito del fabricante de la Chancadora. Es decir, el intervalo de fragmentación se redujo de 100 cm (100% de material) a 45 cm (80% de material), esto reduciría el material cuyo tamaño oscila entre 100 cm y 45 cm a solo un 20%.

Con este valor como requisito, se tenían que hacer mejoras en la fragmentación para llegar al tamaño solicitado. Por ello se hicieron las gestiones para implementar mejoras en la voladura con la implementación de detonadores electrónicos y cambios en los diseños de mallas y factores de carga ya que con la profundización de la mina se habían encontrado materiales más duros como la actinolita. La variabilidad que se redujo fue la fragmentación de mineral a un rango de 45 cm a menos, lo que debía mejorar el flujo de mineral chancado, y la evidencia de la mejora se reflejaría en un mayor tonelaje procesado por chancadora, lo cual se comparara con el flujo antes de la implementación.

Como última etapa se hizo la implementación de la eliminación y /o reducción de las pérdidas, en la cual se encontraron múltiples oportunidades en tiempos de cambio de turno, refrigerios, paradas por reparaciones no programadas, paradas por reparaciones programadas, métodos de trabajo de las áreas operativas y de mantenimiento. De la misma manera estas mejoras se compararían antes y después de realizada la implementación comparando los flujos diarios de producción.

4.1.1.3.3 Reducción y / o eliminación de pérdidas. Las pérdidas encontradas eran muchos y podemos mencionarlos en función de la clasificación de la teoría Lean Six Sigma.

4.1.1.3.3.1 Pérdidas de sobreproducción. *Con respecto a la sobreproducción se encontró que por un tema contractual cuando se tenían problemas en Chancadora primaria, el equipo de carguío y su flota se ubicaban en frentes de desmonte teniendo una sobreproducción de desmonte acumulado al final del contrato de 3 años, por lo que se requería hacer una revisión del contrato para mejorar el stripping ratio y generar costos innecesarios en el flujo de caja anual. Se requería hacer modificaciones sustanciales al contrato para que no se paguen costos innecesarios teniendo la empresa obligaciones por la inversión de la construcción de la nueva planta.*

Se observó que al final de cada año había un movimiento de 115 % de desmonte que la empresa pagaba al contratista, por lo que se exigió al área de contratos rehacer el contrato ya que se consideró que no había justificación para ese gasto.

Así también se encontró gastos en exceso relacionados a la sobreproducción de desmonte en energía eléctrica, combustible e insumos de voladura.

4.1.1.3.3.2 Pérdidas de sobreinventario. Relacionado a la anterior perdida se tenía un sobreinventario de material volado cercano a un mes de adelanto tanto de mineral como de desmonte con los consiguientes sobrecostos mensuales de accesorios de voladura y energía, se solicitó al área de Planeamiento hacer la revisión del nivel de stock apropiado.

4.1.1.3.3.3 Perdida por productos defectuosos. Relacionado a la variabilidad de la fragmentación de mineral volado, cuando se llevaba material a Chancadora con un tamaño de fragmento mayor al especificado en diseño de Chancadora, ocurrían atoros con la consiguiente pérdida de producción y daño a la planta de Chancado, por lo que se optó como primera medida que el equipo de carguío separe el material grueso y se deje en la proximidad del frente, este material luego sería fragmentado haciendo voladura secundaria o reducido con martillo hidráulico, lo que generaba un costo adicional de explosivo o consumo de combustible del equipo de fragmentación.

4.1.1.3.3.4 Pérdida de transporte de materiales y herramientas. Se encontró pérdidas por remanipuleo de materiales en botaderos, donde se encontraban leyes de mineral que por falta de control de leyes en el frente de carguío eran retornados antes que descarguen en el botadero hacia la chancadora, este control se hacía de manera esporádica por lo que se presumía que muchos viajes de mineral terminaban en el botadero.

4.1.1.3.3.5 Perdida por procesos innecesarios. Se encontró en la planta que existía fuga de mineral de los chutes de intercambio de fajas, este mineral se iba acumulando en pilas debido a la dificultad de retornarlos al sistema, posteriormente este material era cargado por una excavadora a un volquete para transportarlo al stock del paquete 4, implicando esto el uso de 2 equipos con los costos respectivos de mantenimiento y consumo de combustible por lo que se hacían gastos adicionales al proceso de la planta.

4.1.1.3.3.6 Perdida por tiempos de espera. Este punto constituía un crítico de la planta, ya que se presentaba en varios subprocesos y sumaba al tiempo parado de planta generando disponibilidad para operar de un 50 a 45% de tiempo total calendario. Siendo el factor más gravitante para el autor de todo lo encontrado y el que requirió inmediata intervención de todo el personal de mina, planta y contratistas. Podemos mencionar como ejemplos de lo encontrado, tiempo desperdiciado en chancadora por falta de alimentación de mina (viajes de camión a chancadora), tiempos muertos por cambios de turno, tiempos muertos por malas prácticas de trabajo del área de mantenimiento.

4.1.1.3.3.7 Perdida por movimientos innecesarios del trabajador. Este punto constituía un crítico de la planta, ya que se presentaba en varios subprocesos y sumaba al tiempo parado de planta generando disponibilidad para operar de un 50 a 45% de tiempo total calendario. Siendo el factor más gravitante para el autor de todo lo encontrado y el que requirió inmediata intervención de todo el personal de mina, planta y contratistas. Podemos mencionar como ejemplos de lo encontrado, tiempo desperdiciado en chancadora por falta de alimentación de mina (viajes de camión a chancadora), tiempos muertos por cambios de turno, tiempos muertos por malas prácticas de trabajo del área de mantenimiento.

Si bien todos las pérdidas conocidas en la teoría Lean Six Sigma podían ser encontrados en la revisión de los procesos, podemos hacer énfasis en los que eran determinantes en su impacto en la producción como eran los tiempos de parada de planta que se podían considerar como tiempos de espera, estos ocurrían debido a diversos factores como podían ser los cambios de turno de la empresa de carguío y acarreo, horas detenidas por refrigerios de personal y voladuras en mina, inadecuada organización del área de mantenimiento en el que no se realizaban trabajos simultáneos de mantenimiento, en una misma parada de planta, inadecuada organización entre mina, planta, mantenimiento, calidad, seguridad, planeamiento, para requerir una parada de planta, estos tiempos desperdiciados de producción fueron atacados y sus resultados se verán en los datos registrados.

4.2. Análisis de resultados

4.2.1 Análisis de validez interna

Para obtener resultados que tengan validez interna en el desarrollo de la implementación se tomaron las siguientes consideraciones para las posibles amenazas a la validez interna.

4.2.1.1 Factores orgánicos. Sobre las competencias y habilidades de las personas: Los operadores de planta chancadora poseen la misma experiencia en la operación del equipo (1 líder con 4 años de experiencia y 1 asistente con 1 año de experiencia). Se tuvo supervisión de la contratista en 3 turnos cuyos ingenieros tenían la misma experiencia aproximadamente (5 a 7 años supervisando carguío acarreo en gran minería). Los cambios en la metodología de trabajo se realizaron en las 3 guardias de operación de la planta. La supervisión de los 3 turnos de operación de la planta chancadora tenía el mismo tiempo realizando dicho trabajo (3 años)

Para las mediciones: La recolección de la información se comenzó a realizar aun antes que se concibiera la metodología de mejora, por lo que se comenzaron recolectando resultados pobres y durante el proceso de mejora, no se puso en conocimiento de los operadores ni supervisores, la implementación, pero si los pasos a realizar. Se consideró la diferencia del flujo de chancado entre los 3 tajos eliminándose la variación de la fragmentación de la roca con la adecuada malla de voladura según la dureza de la roca, para generar la misma fragmentación. Se registraron todos los valores generados por la planta considerándose aleatoriamente algunos registros.

Para la regresión estadística: Se fijó un tonelaje promedio de 2700 tons / hr que era exigido a los supervisores de planta, mina y operadores. Las variaciones de este flujo no eran determinadas por el personal sino por las condiciones de la planta.

Motivación y expectativas: La supervisión de campo no tenía conocimiento del control como una implementación sino más bien como un control rutinario similar a lo que se hacía en la zona antigua de la mina. Toda la supervisión estaba comprometida en

mejorar la situación inicial y se trabajaba dando la máxima productividad posible de la planta.

Maduración: Todos los registros de producción se tomaron considerando las mismas condiciones: días de producción de 24 horas, con las mismas condiciones: cambios de turno, horas de refrigerio, paradas mecánicas diarias programadas de planta, operadores con igual experiencia, edad similar, supervisores con características parecidas de experiencia, edad, tiempo en la empresa.

Agotamiento: Durante todo el proceso de implementación no se tuvieron cambios en el personal que participo en la implementación.

4.2.1.2 Factores estimulares y situacionales. Instrucciones dadas a las personas: existían procedimientos operativos para la operación de la planta que permitían usar los mismos criterios por parte de los diferentes operadores, y procedimientos de gestión para ser usados por los diferentes supervisores.

Características físicas de la situación: los factores climáticos, nivel de ruido y temperatura son los mismos durante la mayor parte del año, la implementación se fue realizando en etapas durante los meses de primavera de la costa del país con temperaturas que oscilan entre los 15 y los 25 grados en un día promedio.

El experimentador se tomaron los datos en forma aleatoria de los registros generados de la producción diaria, se procuró no influir con ningún tipo de sesgo en los mismos.

4.2.1.3 Medida de respuesta. Uso de equipamiento e instrumentación: el control del tonelaje se realizaba con las balanzas de los camiones las cuales se encontraban calibradas y certificadas, a su vez se contrastaba la información con las balanzas electrónicas presentes en las fajas transportadoras aguas debajo de chancadora.

El experimentador: para evitar el sesgo en la información y el experimentador influya en los resultados la recolección de datos fue realizada por personal que no tenía conocimiento de la implementación.

Pretesting: Se hizo la comprobación con los primeros 25% de los valores de la muestra comparándolos con el 75% de la muestra y a su vez comparándolos con el 100% de la muestra, obteniéndose valores cercanos al 100%. En la Tabla 28 se muestra el pretesting antes y después de la implementación.

Tabla 28

Pretesting antes y después de la implementación.

NO IMPLEMENTADO	
PROM 25%	39,616
PROM 75%	39,494
PROM 100%	39,524
DESV ST 25%	3,163
DESV ST 75%	2,184
DESV ST 100%	2,459
IMPLEMENTACIÓN COMPLETA	
PROM 25%	47,153
PROM 75%	46,945
PROM 100%	46,995
DESV ST 25%	1,184
DESV ST 75%	1,323
DESV ST 100%	1,286

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.4 Efecto de los tratamientos múltiples. Efectos de orden: En este caso, al haber pasado casi 2 años desde que se inició la operación de la planta y haber pasado un mes entre cada paso gradual de la implementación este efecto prácticamente es menor o ninguno.

Efecto Carry Over: Antes de la implementación se observa que las muestras tienen resultados de producción menores porque no había metodología de trabajo y no se ven efectos de ningún trabajo de mejora.

4.2.2. Análisis de validez externa

Si es posible generalizar este análisis a trabajos similares de producción de mina y planta donde se busque mejorar los indicadores aplicando esta metodología ya que los procesos mineros son iguales y susceptibles de ser mejorados.

4.2.2.1 Factores orgánicos. Indistintamente la empresa seleccionada para hacer un estudio de aplicación de la metodología será posible lograr mejoras de incremento de producción. Sin embargo para evitar los sesgos que nos entreguen resultados erróneos, debemos asegurar que los valores muestreados sean representativos de toda la muestra, teniendo un registro diario de la población, estos registros tienen una codificación de fecha con un número de ítem de dato, con esta información se puede utilizar la herramienta Excel para la generación de números aleatorios de los ítems y así tener la misma probabilidad de escoger cualquier dato generado en los registros de producción.

4.2.2.2 Factores situacionales. Actualmente todas las empresas mineras realizan medidas de sus indicadores, no medir indicadores se considera impensable porque esto nos muestra que necesidad de mejora se requiere, para el caso de estudio se consideró el no comunicar al personal de operaciones el intento de implementación sino hacer la recopilación habitual de resultados para que los individuos parte del experimento no modifiquen sus conductas al conocer la implementación, considerando que al saber que su productividad iba a ser objeto de estudio podrían modificar sus conductas y alterar el resultado de los datos.

4.2.2.3 Pretesting y efectos de tratamiento múltiple. Para evitar el Pretesting no se puso en conocimiento a la operación que se estaba realizando la implementación, solo comunicándose al finalizar la última fase de la implementación. Para evitar el efecto de tratamiento múltiple, se consideró evitar realizar mejoras ajenas a la implementación para entender los efectos de la misma, solo durante el tiempo de prueba, buscándose alternativas de mejora, a la finalización de la misma.

4.2.2.4 Efecto novedoso. En los meses siguientes a la implementación se observó que los indicadores de producción fueron sostenidamente mejorados, y no se observó un retorno a la producción anterior a la implementación mientras se realizaran las mismas prácticas operativas que llevaron a la mejora.

4.3 Prueba de hipótesis

La hipótesis nula plantea que la media de la producción diaria de mineral chancado no se ha incrementado con la implementación Lean Six Sigma:

$$H_0: \mu = 39,336.5 \text{ tons / hora}$$

La hipótesis alternativa sostiene que la media de la producción diaria si se ha incrementado con la implementación

$$H_0: \mu > 39,336.5 \text{ tons / hora}$$

Haciendo uso de la herramienta de análisis de datos de Excel para la muestra sin implementación y para cada implementación, empezamos con la contrastación con la primera implementación. En la Tabla 29 se presenta la prueba estadística T para medias de dos muestras emparejadas antes y después de la primera implementación.

Tabla 29

Prueba estadística t para medias de dos muestras emparejadas antes y después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	NO IMPLEMENTADO	RED. SOBRECARGA
Media	39,534.74	44,353.70
Varianza	4,180,335.70	3,544,785.91
Observaciones	74.00	74.00
Coefficiente de correlación de Pearson	0.06	
Diferencia hipotética de las medias	0.00	
Grados de libertad	73.00	
Estadístico t	-15.41	
P(T<=t) una cola	0.00	
Valor crítico de t (una cola)	1.67	
P(T<=t) dos colas	0.00	
Valor crítico de t (dos colas)	1.99	

Fuente: Elaboración propia

Para la primera parte de la implementación se rechaza la hipótesis nula que dice que las medias son iguales, al ser el valor P de una cola muy pequeña en comparación con el T crítico y se acepta la hipótesis alternativa que indica que la media de la

implementación de la reducción de la sobrecarga es mayor a la media de los datos sin implementación.

Ho: Las medias antes y después de la reducción de sobrecarga son iguales.

H₁: La media de la implementación de la reducción de la sobrecarga es mayor que la media de la no implementación.

La Tabla 30 muestra la comparación entre medias antes y después de la 1° implementación.

Tabla 30

Comparación entre las medias antes y después de la primera implementación: reducción de la sobrecarga.

	NO IMPLEMENTADO	RED. SOBRECARGA
MEDIA	39535	44354

Fuente: Elaboración propia

De los resultados se acepta la hipótesis alternativa, la implementación de la reducción de sobrecarga ha permitido incrementar la media de producción diaria de mineral enviado a chancadora.

La Tabla 31 muestra la comparación de las medias de reducción de la sobrecarga y la implementación del siguiente paso, reducción de la variabilidad:

Tabla 31

Prueba estadística t para medias de dos muestras emparejadas antes y después de la segunda implementación: reducción de la variabilidad

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	RED. SOBRECARGA	RED. VARIABILIDAD
Media	44353.7027	45180.97297
Varianza	3544785.91	2283430.52
Observaciones	74	74
Coefficiente de correlación de Pearson	0.066135299	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	73	
Estadístico t	-3.047819922	
P(T<=t) una cola	0.001604294	
Valor crítico de t (una cola)	1.665996224	
P(T<=t) dos colas	0.003208588	
Valor crítico de t (dos colas)	1.992997126	

Fuente: Elaboración propia

Para este caso también se rechaza la hipótesis nula que dice que dice que las medias son iguales, al ser el valor P de una cola muy pequeño en comparación con el T crítico y se acepta la hipótesis alternativa que indica que la media de la implementación de la reducción de la sobrecarga y reducción de la variabilidad es mayor a la media de los datos de la reducción de la sobrecarga.

La contrastación de la hipótesis sería:

H₀: Las medias de la implementación de la sobrecarga y de la reducción de sobrecarga más la reducción de la variabilidad son iguales.

H₁: La media de la implementación de la reducción de la sobrecarga más la reducción de la variabilidad es mayor que la media de la reducción de la sobrecarga.

En la Tabla 32 se muestra la comparación entre las medias antes y después de la segunda implementación.

Tabla 32

Comparación entre las medias antes y después de la segunda implementación: reducción de la variabilidad.

	RED. SOBRECARGA	RED. SOBR. + RED VAR
MEDIA	44354	45181

Fuente: Elaboración propia

De los resultados se acepta la hipótesis alternativa, la implementación de la reducción de sobrecarga más la reducción de la variabilidad ha permitido incrementar la media de producción diaria de mineral enviado a chancadora.

En la Tabla 33 se presenta la última parte de la implementación donde se tuvieron los siguientes resultados de la comparación:

Tabla 33

Prueba estadística t para medias de dos muestras emparejadas antes y después de la tercera implementación: reducción y / o eliminación de las pérdidas.

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	<i>RED. VARIABILIDAD</i>	<i>RED. DESPERDICIOS</i>
Media	45180.97297	46995.25676
Varianza	2283430.52	1654385.728
Observaciones	74	74
Coeficiente de correlación de Pearson	0.082544515	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	73	
Estadístico t	-8.206351463	
P(T<=t) una cola	0.000000	
Valor crítico de t (una cola)	1.665996224	
P(T<=t) dos colas	0.000000	
Valor crítico de t (dos colas)	1.992997126	

Fuente: Elaboración propia

Para este último caso también se rechaza la hipótesis nula que dice que dice que las medias son iguales, al ser el valor P de una cola pequeño en comparación con el T crítico y aceptamos nuevamente la hipótesis alternativa que indica que la media de producción diaria de la implementación total del Lean Six Sigma es mayor a la media de producción diaria de los datos de reducción de la sobrecarga y reducción de la variabilidad. En la Tabla 34 se presenta la comparación entre las medias antes y después de la tercera implementación.

Tabla 34

Comparación entre las medias antes y después de la tercera implementación: reducción y / o eliminación de pérdidas.

	<i>RED. SOBR. + RED VAR</i>	<i>IMPLEMENT. TOTAL</i>
MEDIA	45181	46995

Fuente: Elaboración propia

Finalmente vemos que la hipótesis alternativa, la implementación total Lean Six Sigma permite incrementar la media de producción diaria de mineral enviado a chancadora.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula que planteaba que la media de la producción diaria no se ha incrementado con la implementación $H_0: \mu = 39,336.5$ tons / hora, y aceptamos la hipótesis alternativa que sostenía que la media de la producción diaria si se ha incrementado con la implementación $H_0: \mu > 39,336.5$ tons / hora.

4.4 Discusión de resultados

Al realizar la prueba T para dos medias emparejadas usando la herramienta de análisis de datos de Excel, se configuro el parámetro α en 0.05, es decir existe una probabilidad del 5% de haber cometido un error Tipo 1 al rechazar la hipótesis nula.

4.5 Nuevas líneas de investigación

El presente trabajo tiene la intención de mostrar que es posible obtener mejores resultados e indicadores con la implementación de la metodología Lean Six Sigma, en minería no se tienen muchos trabajos al respecto en nuestro país, es posible usar la metodología para aplicarla a otras funciones dentro del rubro minero:

- Lean Six Sigma aplicado a la calidad del mineral entregado a planta, teniendo el mineral enviado a planta requisitos que debe cumplir como tamaño de malla, porcentaje de finos, leyes de mineral, contenidos penalizables, etc. es una oportunidad de hacer un trabajo donde se aplique la reducción de la variabilidad, reducción de las pérdidas como el reproceso, etc.
- Lean Six Sigma aplicado a la reducción de costos, teniendo oportunidades para eliminar las pérdidas de sobrecostos, al usar materiales de mayor duración, mejoras de diseño para incrementar tonelajes, reducción de inventarios por estandarización.
- Lean Six Sigma aplicado al rediseño de procesos, teniendo que realizarse un análisis de confiabilidad de planta, selección de equipos en base a producción, factor de seguridad de diseño, logística disponible en el país para el mantenimiento, etc.

- Lean Six Sigma aplicado al mantenimiento de planta, donde se busque reducir las paradas no programadas de planta, aumentar la confiabilidad de los equipos, mejorar los métodos de trabajo de mantenimiento, etc.

Conclusiones

Por cada elemento limitante de la productividad se obtuvieron resultados parciales que suman para lograr la mejora general de los indicadores de producción, así tenemos:

- Se obtuvo una mejora significativa de la media de producción diaria de 12% de incremento con la reducción de la sobrecarga, al reducirse el flujo horario en Tons / hr. Esto debido a que se estaba trabajando con equipos sub dimensionados, principalmente la planta de zarandas y la faja 014 – 003, que presentaban fallas diarias. En el caso de la zaranda las fisuras en la estructura del cajón posterior con la caída del mismo generaba pérdidas de producción del 33% de las disponibles para operar y la rotura de los empalmes de la faja 014-003 generaban pérdidas de producción de 28% de la producción planificada, los problemas de desgaste prematuro de blindajes de chutes y atoros se redujeron al reducir la sobrecarga del sistema, por lo que se evidenciaba que se tenían problemas con la ingeniería de diseño, la selección de equipos de planta, las capacidades nominales de diseño tenían que ser revisadas, y se tenía que trabajar a un tonelaje promedio menor hasta que se realicen las modificaciones de diseño. La reducción de la sobrecarga también beneficio a la operación de la mina al tener menos tiempo de camiones esperando en chancadora y palas sin camiones con el consiguiente incremento de productividad en tajo. La sobrecarga era una limitante importante para la producción de la Ampliación de la Planta.
- Se redujo la variabilidad de la fragmentación de mineral, acorde a los requerimiento de chancadora ($P_{80} = 45 \text{ cm}$), se redujeron los tiempos perdidos por atoros en chancadoras, así también se tuvo un mejor flujo procesado, con menor recirculación de mineral en chancadora secundaria, todo ello suma para que al final de cada día de producción se obtuvieran mayores tonelajes, también se observa que no se podía obviar el monitoreo de fragmentación y se tenía que

realizar de forma permanente, si bien la empresa proveedora de insumos de voladura, daba información de la fragmentación en los frentes de carguío de palas, se está implementando un sistema de monitoreo permanente de granulometría en fajas transportadoras para corroborar los resultados del monitoreo en campo.

- Se redujeron las pérdidas expresados en tiempos de parada de planta, por cambios de turno, refrigerios, transporte de personal en operación y fuera de la operación, abastecimiento de mineral a chancadora, tiempos de parada por voladura, tiempos de parada por mantenimiento correctivo y preventivo, se cambiaron los métodos de trabajo del mantenedor de planta, y también del proveedor del servicio de movimiento de materiales en mina, todos estos aspectos permitieron lograr un incremento de producción en la ampliación de la Mina Marcona.
- Las mejoras implementadas con el Lean Six Sigma mitigan las 3 limitantes de la producción y permitieron incrementar la producción de la Ampliación Marcona.

Recomendaciones

Las recomendaciones metodológicas son:

- Debido a las restricciones propias de la actividad analizada no era posible realizar la segunda y tercera implementación parcial del Lean Six Sigma separadamente de la implementación anterior ya realizada debido a las obvias pérdidas de producción si se intentara eliminar la mejora anterior, es decir en este trabajo se siguió un orden: reducción de sobrecarga, reducción de variabilidad, reducción y / o eliminación de pérdidas, por lo que si se intentaran trabajos similares se debería analizar la implementación en otro orden de aplicación para analizar los efectos.
- En este trabajo no se ha analizado el cálculo del factor de sobrecarga, el valor asignado que permitió reducir la presión de sobrecarga del sistema fue asignado de forma empírica, por lo que podría ser un tema de tesis o trabajo técnico el cálculo de la producción optima horaria.
- La reducción de la variabilidad fue enfocada en la fragmentación del mineral entregado a chancadora, pero las opciones de aplicación de este aspecto son múltiples como podría ser su aplicación a los métodos de trabajo de mantenimiento que pueden generar tiempos mayores o menores de planta en mantenimiento con la consiguiente incertidumbre del tiempo disponible para operar, este aspecto no fue considerado en este trabajo.
- La reducción y/o eliminación de pérdidas fue enfocada en nuestro trabajo con respecto a los tiempos no productivos como paradas de planta, tiempos operativos, pero también se podría enfocar en pérdidas de producción por mineral que sale del sistema por fugas de mineral de la planta debido a falta de hermetización de chutes o tolvas, que en la planta son considerables. También se podría analizar las pérdidas por los cuellos de botellas o los incidentes generados por contratistas por lucro cesante.

Referencias bibliográficas

- Anaya G. (2020). *Diseño de la propuesta de implementación de un sistema de mantenimiento productivo total TPM para la Empresa Colombiana de Cementos S.A.S. en la región de Rio Claro – Antioquía*. [Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de: Magister en Administración de Empresas, MBA]
- Asociación para el progreso de la Dirección. (2019). *Lean Six Sigma ¿Cómo funciona esta metodología para reducir fallos?* <https://www.apd.es/lean-six-sigma-como-funciona/>
- Bahamondez, M. (2017). *Implementación de Sistema de Gestión para reducción de costos optimizando el desempeño por componentes de equipos mineros*. [Tesis para optar por el Título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile].
- Barrientos, N y Tapia, L. (2020). *Modelo Lean Manufacturing de reducción de mudas aplicando el trabajo estandarizado para reducir la cantidad de productos con defectos en Mypes textiles*. [Tesis de Investigación para optar el grado de bachiller en Ingeniería Industrial].
- Carvalho de Souza, B; Alcântara, G, Parreira P; Júnior, R y Pereira de Souza M. (2018). *Implantação do programa 5S através da metodologia DMAIC. Edição Especial, Farney Vinicios Pinto Souza, Brazilian Journal of Development 4(5)*.
- Castillo, G. (2013). *Implementación de Metodología Lean en desarrollo minero*. [Tesis para optar por el grado de Magister en Ciencias de Ingeniería Pontifica, Universidad Católica de Chile].
- Council for Six Sigma Certification. (2018, junio). *Six Sigma Black Belt Certification Training manual*.
- EY. (2021). *Los 10 principales riesgos y oportunidades de minería y metales a nivel mundial 2021*.
- Flores, M. (2022) *¿Qué es la implementación de un proyecto?* Taskenter. <https://www.taskenter.com/blog/nwarticle/57/1/que-es-la-implementacion-de-un-proyecto>

- George, M. (2003) *Lean Six Sigma for services*. Mac Graw Hill.
- Gonzalez, M. (2020). El método Lean Six Sigma clave en la mejora de procesos de tu empresa. *Izertis*. <https://www.izertis.com/es/-/post/metodo-lean-six-sigma-mejora-procesos-de-tu-empresa#:~:text=El%20principio%20fundamental%20de%20Lean,a%20la%20perfecci%C3%B3n%2C%20reduciendo%20al>
- Hernández, R; Fernández, C y Baptista, P (2010). *Metodología de la Investigación, Quinta Edición*. Mc Graw Hill.
- Izagirre Neira, J y Párraga Velásquez, M. (2017) *Aplicación de las metodologías 8D y AMFE para reducir fallos en una fábrica de refrigeradoras*
- Lévano, L. (2012). *Incremento de Productividad mediante herramientas SS*. [Tesis para optar por el título de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Madariaga, F. (2013). *Lean Manufacturing exposición adaptada a la fabricación repetitiva de familia de productos mediante procesos discretos*.
- Marín, P (2015). Lean Six Sigma. Curso Taller del Programa de Especialización en Gestión Empresarial Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). Minería Peruana, motor de crecimiento en un contexto de crisis, Comité de Gestión Minero Energético como plataforma regional de articulación y diálogo. *Boletín Estadístico Minero*,12.
- Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería D.S. No. 023-2017-EM*.
- Morales, A. (2021). *Curso de cierre de minas*, Cepal.
- Moreno, D; Grimaldo G y Salamanca, M. (2017). El mapeo de la cadena de valor como herramienta de diagnóstico de sistemas productivos. Caso línea de producción láctea. *Revista Espacios*.
- Navarro, E; Gisbert V y Pérez A. (2017). Metodología e implementación de Six sigma *Revista 3C Empresa*

- Paz, A. (2015). Optimización en minería subterránea a través de la metodología Lean Six Sigma [conferencia]. *Convención Minera 2015*.
- Rojas, P. & Gisbert, V. (2017). Lean Manufacturing: Herramienta para mejorar la productividad en las empresas. *Revista 3C Empresa*.
- Socconini, L. (2017). *Lean Manufacturing paso a paso*, Primera Edición, Pandora Impresores.
- Suarez M. y Dávila, J. (2019). *Encontrando el Kaizen, Un análisis teórico de la mejora continua*. Universidad de León.
- Taghizadegan, S (2006). *Essentials of Lean Six Sigma*. Elsevier.
- Yacuzzi, E. (2005). *La Gestión Hoshin: modelos, aplicaciones características distintivas*, sf. Universidad del CEMA.
- Sociedad Minera Cerro Verde. (2020). *Memoria Anual 2020*, pag. 17.

Anexos

Anexo 1. Nomenclatura

$T_{\text{día}}$ = Flujo diario de toneladas procesadas (Tons/día)

T_{hora} = Flujo horario de toneladas procesadas (Tons/hora)

P_{100} = Tamaño de fragmento que ingresa bajo el cual está el 100% de la distribución (cm)

P_{80} = Tamaño de fragmento que ingresa bajo el cual está el 80% de la distribución (cm)

F_{80} = Tamaño de fragmento que sale bajo el cual está el 80% de la distribución (cm)