



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



**PROPUESTA DE UN MODELO DE MEJORA CONTINUA BASADO EN  
HERRAMIENTAS LEAN CON ENFOQUE SEIS SIGMA EN PLANTA  
CONCENTRADORA DE EMPRESA MINERA**

POR

**Patricio Alejandro Soto Jara**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para  
optar al título profesional de Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía

Dr. Hernaldo Reinoso Alarcón

Profesional Supervisor

Mariajosé Belén Matus Calabrano

Camilo Edmundo Urrutia Cabezas

Julio 2022

Concepción (Chile)

© 2022 Patricio Alejandro Soto Jara

© 2022 Patricio Alejandro Soto Jara

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## Dedicatoria

---

*We are not now that strength which in old days  
Moved earth and heaven, that which we are, we are;  
One equal temper of heroic hearts,  
Made weak by time and fate, but strong in will  
To strive, to seek, to find, and not to yield.*

**Ulysses, Lord Alfred Tennyson (1809 - 1892)**

---

Este trabajo se lo dedico a mis padres, quienes son mi fuente de amor, apoyo y aprendizaje. Ellos han sido y serán siempre mi guía valórica en este camino.

A mi hermana Cecilia, quien es mi amiga y compañera de vida. Ella es quien me anima a seguir adelante y a quien yo admiro por ser siempre leal, perseverante y estar conmigo en todo momento.

A mis amigos Arthur, Daniela, Karen, Luciano, Pablo y Vicente, los que me han acompañado en este viaje universitario, que me han impulsado buscar ser un mejor amigo cada día y que han dejado en mí recuerdos que llevaré en el futuro con gran alegría.

A mis amigos Javiera y Danilo, quienes me han abierto las puertas de su hogar y han confiado en mí para ser un amigo de la familia que han formado.

También quiero agradecer a todas las personas que han entrado en mi vida y me han hecho ver las cosas desde distintos puntos de vista y hacerme una mejor persona.

Por último, quiero agradecer a las personas que ya no están conmigo y que dejaron en mí su cariño, enseñanzas, historias y experiencias. A ellas siempre las recordaré y sus huellas serán eternas.

## **Agradecimientos**

---

Agradezco en primera instancia a la Corporación Nacional del Cobre, a la División Andina y a todo el equipo de Excelencia Operacional. Estoy muy agradecido con cada uno de ellos, en especial con Mariajosé Matus, tanto por la ayuda que me brindaron en el camino de enseñanza, en un mundo desconocido para mí, como en el apoyo moral que representaba la realización de esta memoria.

Es imperativo para mí también, agradecer a todas las personas que me han dado una oportunidad, han creído en mi trabajo profesional y que han depositado en mí su confianza. Agradezco a Pablo Jaña y Daniel Muñoz quienes me dieron la oportunidad, y brindaron su apoyo, de comenzar mi carrera profesional con mi primera práctica profesional.

Por último, y más importante, quiero agradecer a todos los profesores/as que me han enseñado y brindado conocimiento y han sido guías desde mi primera profesora Cecilia Orellana hasta los profesores/as de la Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería y Departamento de Ingeniería Industrial.

## Sumario

---

Este estudio presenta las principales problemáticas que se encuentran en dos moliendas de una planta concentradora de una empresa minera, la Corporación Nacional del Cobre, específicamente en la División Andina ubicada en Los Andes, Chile. Dichas problemáticas, de carácter productivo y de gestión de calidad, son abordadas con ayuda de análisis basados en herramientas *Lean*, las cuales tienen su origen en Japón en Toyota Motor Corporation. Estas herramientas han sido mejoradas y ajustadas para cada necesidad a lo largo del tiempo y sentó las bases para lo que se conoce como Seis Sigma y *Lean Seis Sigma* (Motorola). En División Andina, actualmente existen aplicaciones de herramientas *Lean* mas no de Seis Sigma. Las herramientas *Lean* utilizadas para el desarrollo fueron método 5S, *Single-Minute Exchange of Die* (SMED), *Value Stream Mapping* (VSM) y Seis Sigma para determinar la capacidad del proceso y el respectivo nivel Sigma en la planta concentradora para variables de calidad del proceso con base en los estándares operacionales. Para lograr dilucidar las causas de la variabilidad de tratamiento de mineral se aplicó el método 5S en una bodega de la empresa contratista Siemens y en el área de moliendas. Para esto se levantó información de terreno y se aplicaron evaluaciones de las condiciones actuales de dichas áreas llegando a que el mayor problema en esta materia son la ausencia de disciplina y desorden generalizado de los espacios de trabajo. Para SMED, se realizó un análisis de los tiempos y motivos por equipos que causan detenciones en el proceso logrando hallar las principales causas de fallas no programadas de carácter mecánica, eléctrica y de lubricación. Los gráficos de Pareto utilizadas resultaron de gran utilidad para realizar el análisis y determinar los equipos a los que se le debe poner énfasis en términos de mantenimiento de acuerdo con una priorización que mezcla cantidad de eventos y horas totales de detención. Para VSM en cambio, se presentan las limitaciones de la realización y se propone una alternativa para comprender la cadena de valor con un enfoque en las entradas y salidas en el proceso en cuestión a través de un diagrama SIPOC. Es importante destacar que, de las variables analizadas en las moliendas, ninguna alcanza el nivel seis sigma. El nivel más alto logrado resultó con un valor de 2,88 y el más bajo con 0,66 lo que es prueba suficiente para mantener un control estricto de estas variables de calidad. Finalmente, dentro de los resultados más relevantes logrados fue establecer por primera vez un análisis Seis Sigma y que dicha metodología y herramientas de esta, se puedan extender a otras áreas productivas. Por otro lado, también se elaboró un *layout* con los hallazgos siguiendo el método 5S del área de moliendas ya que no existe un plano de planta lo cual es una de las problemáticas y uno de los trabajos futuros recomendados para División Andina.

## Summary

---

This study presents the main problems found in two mills of a concentrator plant of a mining company, Corporación Nacional del Cobre, specifically in the Andina Division located in Los Andes, Chile. These problems, of a productive and quality management nature, are addressed with the help of analyses based on Lean tools, which originated in Japan at Toyota Motor Corporation. These tools have been improved and adjusted to each need over time and laid the foundations for what is known as Six Sigma and Lean Six Sigma (Motorola). In División Andina, currently there are applications of Lean tools but not Six Sigma. The Lean tools used for the development were 5S method, Single-Minute Exchange of Die (SMED), Value Stream Mapping (VSM) and Six Sigma to determine the process capability and the respective Sigma level in the concentrator plant for process quality variables based on the operational standards. In order to elucidate the causes of the variability of the ore treatment, the 5S method was applied in a warehouse of the contractor Siemens and in the milling area. For this purpose, field information was collected and evaluations of the current conditions of these areas were applied, reaching the conclusion that the biggest problem in this area is the absence of discipline and generalized disorder in the workspaces. For SMED, an analysis of the times and reasons by equipment that cause stoppages in the process was carried out and the main causes of unscheduled mechanical, electrical and lubrication failures were found. The Pareto charts used were very useful to perform the analysis and determine the equipment that should be emphasized in terms of maintenance according to a prioritization that mixes the number of events and total hours of stoppage. For VSM, on the other hand, the limitations of the implementation are presented and an alternative is proposed to understand the value chain with a focus on the inputs and outputs in the process in question through a SIPOC diagram. It is important to note that, of the variables analyzed in the mills, none reached the six sigma level. The highest level achieved was 2.88 and the lowest was 0.66, which is sufficient evidence to maintain strict control of these quality variables. Finally, one of the most relevant results achieved was to establish for the first time a Six Sigma analysis and that this methodology and its tools can be extended to other productive areas. On the other hand, a *layout* was also elaborated with the findings following the 5S method of the milling area, since there is no plant plan, which is one of the problems and one of the future works recommended for División Andina.

## Tabla de Contenidos

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Lista de Tablas</b> .....   | 9  |
| <b>Lista de Figuras</b> .....  | 10 |
| <b>1. Capítulo I: Introducción</b> .....                                       | 11 |
| 1.1    Introducción.....   | 11 |
| 1.2    Antecedentes Generales.....   | 12 |
| 1.2.1    Contexto de la Corporación Nacional del Cobre .....                   | 12 |
| 1.2.2    Contexto de la División Andina .....                                  | 13 |
| 1.2.3    Sistema de Gestión C+ y Herramientas Lean.....                        | 14 |
| 1.2.4    Principales Problemáticas del Contexto y el Proceso .....             | 15 |
| 1.3    Objetivos y Descripción General del Proyecto.....                       | 16 |
| 1.3.1    Objetivo General .....  | 16 |
| 1.3.2    Objetivos Específicos .....   | 16 |
| 1.3.3    Justificación del Tema.....   | 17 |
| 1.4    Descripción del Contexto .....  | 18 |
| 1.4.1    Descripción General del Proceso de Obtención del Cobre .....          | 18 |
| 1.4.2    Descripción General de Moliendas SAG y Unitaria 2 .....               | 19 |
| 1.5    Revisión Bibliográfica.....   | 24 |
| 1.6    Marco Teórico .....   | 24 |
| 1.6.1    Método 5S .....   | 24 |
| 1.6.2    Value Stream Mapping (VSM) .....                                      | 28 |
| 1.6.3    Single-Minute Exchange of Die (SMED) .....                            | 29 |
| 1.6.4    Six Sigma (Seis Sigma).....   | 31 |
| 1.7    Estrategia de Aplicación, Metodología y Métodos Utilizados .....        | 32 |
| <b>2. Capítulo II: Desarrollo</b> .....  | 34 |
| 2.1    Análisis de Método 5S.....  | 34 |
| 2.1.1    Implementación en Bodega Siemens .....                                | 35 |
| 2.2.2.    Levantamiento de Información y Elaboración de Layout de Planta ..... | 37 |
| 2.2    Tonelaje de Entrada a Moliendas .....                                   | 41 |
| 2.3    Análisis de Detenciones por Equipos de Moliendas para SMED .....        | 43 |
| 2.3.1    Análisis Pareto de Eventos por Equipo .....                           | 46 |
| 2.3.2    Análisis Pareto de Horas por Equipo (MSAG) .....                      | 47 |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.3     | Análisis Pareto de Horas por Equipo (MUN2) .....   | 48        |
| 2.3.4     | Aplicaciones e Implementaciones de SMED en División Andina.....  | 51        |
| 2.4       | Análisis para la Realización de Value Stream Mapping .....   | 52        |
| 2.5       | Análisis Seis Sigma del Proceso.....   | 55        |
| 2.5.1     | Variables de Calidad del Proceso (Definir y Medir).....  | 55        |
| 2.5.2     | Métricas Seis Sigma y Capacidad del Proceso (Analizar) .....   | 57        |
| <b>3.</b> | <b>Capítulo III: Discusión y Conclusiones.....</b>   | <b>61</b> |
| 3.1       | Discusión .....  | 61        |
| 3.2       | Conclusiones.....  | 62        |
| 3.3       | Trabajo Futuro Recomendado .....   | 63        |
| <b>4.</b> | <b>Referencias.....</b>  | <b>65</b> |
| <b>5.</b> | <b>Anexos .....</b>  | <b>67</b> |
|           | Anexo A: Diagrama de Flujo de Procesos – División Andina .....   | 67        |
|           | Anexo B: Lista de Comprobación del Diagnóstico de las 5S en el Lugar de Trabajo (Formato para Estándar)..... | 67        |
|           | Anexo C: Etiqueta Roja para Áreas de Trabajo Pequeñas y Medianas (Formato para Estándar)..                   | 69        |
|           | Anexo D: Carteles Rojos para Áreas de Trabajo Grandes (Formato para Estándar) .....                          | 70        |
|           | Anexo E: Lista de Hallazgos en Inspección de Área (Formato para Estándar) .....                              | 71        |
|           | Anexo F: Análisis de Capacidad Sixpack de los Procesos .....   | 72        |
| <b>6.</b> | <b>Resumen FI.....</b>   | <b>75</b> |

## Lista de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1: Principales Equipos del Proceso de Molienda SAG .....   | 22 |
| Tabla 1.2: Principales Equipos del Proceso de Molienda Unitaria 2 .....  | 23 |
| Tabla 1.3: Paso 1 (Seiri – Clasificar) .....   | 26 |
| Tabla 1.4: Paso 2 (Seiton – Ordenar) .....   | 26 |
| Tabla 1.5: Paso 3 (Seiso – Limpieza).....  | 26 |
| Tabla 1.6: Paso 4 (Seiketsu – Estandarizar).....   | 27 |
| Tabla 1.7: Paso 5 (Shitsuke – Disciplina) .....  | 27 |
| Tabla 1.8: Etapas de la Aplicación SMED en Operaciones de Mantenimiento.....                                       | 30 |
| Tabla 1.9: Etapas SMED Definidas en Codelco .....  | 30 |
| Tabla 2.1: Resultados de la Evaluación .....   | 36 |
| Tabla 2.2: Número de Hallazgos 5S por Equipo (MSAG) .....  | 38 |
| Tabla 2.3: Número de Hallazgos 5S por Equipo (MUN2).....   | 38 |
| Tabla 2.4: Estadísticas Descriptivas del Tonelaje por Molienda .....   | 42 |
| Tabla 2.5: Días con Tonelaje Mínimo (0 tms) por Molienda.....  | 42 |
| Tabla 2.6: Estadísticas Descriptivas del Tonelaje por Molienda (sin Considerar Días con 0 tms de Producción) ..... | 42 |
| Tabla 2.7: Horas por Tipo de Detención (Año 2021) .....  | 45 |
| Tabla 2.8: Resumen del Análisis Pareto de Equipos por Horas y Eventos (MSAG).....                                  | 49 |
| Tabla 2.9: Resumen Análisis Pareto de Equipos por Horas y Eventos (MUN2).....                                      | 49 |
| Tabla 2.10: Principales Causas de Falla en MSAG .....  | 50 |
| Tabla 2.11: Principales Causas de Falla en MUN2.....   | 50 |
| Tabla 2.12: Estándares Operacionales de Moliendas.....   | 56 |
| Tabla 2.13: Estadísticas Descriptivas de las Variables de Calidad.....   | 56 |
| Tabla 2.14: Métricas de Capacidad y $6\sigma$ .....  | 58 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1: Línea de Tiempo de Codelco.....   | 12 |
| Figura 1.2: Divisiones y Operaciones Mineras .....  | 13 |
| Figura 1.3: Sistema de Gestión C+.....  | 15 |
| Figura 1.4: Proceso Productivo de División Andina con Énfasis en Chancado y Molienda .....                            | 20 |
| Figura 1.5: Molienda SAG .....  | 21 |
| Figura 1.6: Molienda Unitaria 2.....  | 23 |
| Figura 1.7: Pasos del Método 5S.....  | 25 |
| Figura 1.8: Visualización Gráfica de un VSM.....  | 29 |
| Figura 1.9: Proceso $3\sigma$ y $6\sigma$ .....   | 31 |
| Figura 1.10: Cinco Pasos de la Mejora Seis Sigma.....   | 32 |
| Figura 1.11: Estrategia para la Generación del Modelo.....  | 33 |
| Figura 1.12: Actividades para Lograr los Objetivos Propuestos.....  | 33 |
| Figura 2.1: Hallazgos 5S en División Chuquicamata .....   | 34 |
| Figura 2.2: Gráfico Radial de Resultados de la Implementación 5S .....  | 37 |
| Figura 2.3: Layout MSAG con Hallazgos 5S .....  | 39 |
| Figura 2.4: Layout MUN2 con Hallazgos 5S.....   | 40 |
| Figura 2.5: Hallazgos en Área de Molienda.....  | 41 |
| Figura 2.6: Histograma Tonelaje MSAG (superior) y MUN2 (inferior) .....   | 43 |
| Figura 2.7: Motivos de Detenciones por Niveles.....   | 44 |
| Figura 2.8: Porcentajes de Detenciones Respecto a Horas Totales de MSAG (izquierda) y MUN2 (derecha).....             | 45 |
| Figura 2.9: Detalle en Detenciones No Programadas en Base a Horas Totales para MSAG (izquierda) y MUN2 (derecha)..... | 45 |
| Figura 2.10: Gráfico de Pareto por Equipo y Evento para MSAG (superior) y MUN2 (inferior).....                        | 46 |
| Figura 2.11: Horas de Detención por Equipo (MSAG) .....   | 47 |
| Figura 2.12: Horas de Detención por Equipo (MUN2).....  | 48 |
| Figura 2.13: Plano y Especificaciones Técnicas del Martillo Hidráulico B81 .....                                      | 52 |
| Figura 2.14: Variables Manipuladas y Controladas de MSAG.....   | 53 |
| Figura 2.15: Variables Manipuladas y Controladas de MUN2 .....  | 54 |
| Figura 2.16: Diagrama SIPOC del Área de Moliendas .....   | 55 |
| Figura 2.17: Gráficas de Probabilidad de Variable Potencia de Moliendas.....  | 57 |
| Figura 2.18: Diagrama de Ishikawa para Causa y Efecto del Problema .....  | 60 |

# 1. Capítulo I: Introducción

---

## 1.1 Introducción

La Corporación Nacional del Cobre (Codelco) en el año 2016 inició la implementación de un sistema de gestión denominado C+, el cual se basa en los fundamentos de *Lean Management*<sup>1</sup> para lograr una excelencia operacional en todas las áreas y niveles de la Corporación (Codelco, 2017). Dicho sistema de gestión se basa en un ciclo, definido por la Corporación según las cuatro etapas del Ciclo de Deming<sup>2</sup> y adaptado a sus necesidades, las cuales son: objetivo común, mejora continua, procesos eficientes y desarrollo de personas.

Específicamente, este trabajo se gestó desde la División Andina ubicada en la región de Valparaíso y que es una de las nueve operaciones de la Corporación incluyendo Casa Matriz (Codelco, 2022a). La División Andina es una operación minera que consta de una mina subterránea y una a rajo abierto. La roca extraída pasa a una planta de chancado y transporte para seguir el proceso en una planta concentradora donde se encuentran las moliendas. En cuanto al proceso de moliendas, se identifican cuatro líneas, las cuales son: molienda unitaria 1 (MUN1), molienda unitaria 2 (MUN2), molienda semiautógena (MSAG) y molienda convencional (MCONV). Finalmente, el proceso productivo concluye en la planta de filtros de cobre fino y molibdeno.

El enfoque de este informe fue, principalmente, determinar las causas de la variabilidad de producción de los procesos de las líneas MSAG y MUN2 de la planta concentradora y proponer un modelo que permita reducirla. Estos objetivos se desarrollan con mayor detalle en la sección 1.3.

Haciendo uso de herramientas *Lean* como Método 5S (5S), *Single-Minute Exchange of Die* (SMED), *Value Stream Mapping* (VSM) y desde un enfoque *Six Sigma* ( $6\sigma$ ), se propondrá un modelo para reducir la variabilidad de los procesos en términos de especificaciones (como tratamiento de mineral, entre otros) y reducción de tiempos de mantenimiento con el fin de mejorar la calidad del proceso de moliendas.

---

<sup>1</sup> Lean Management: sistema de gestión con bases en *Lean Manufacturing* desarrollado por Toyota Motor Corporation orientado a la excelencia operacional de los procesos de una industria.

<sup>2</sup> Ciclo de Deming (o Ciclo de Shewhart): es un ciclo de mejora continua conocido también como Ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*).

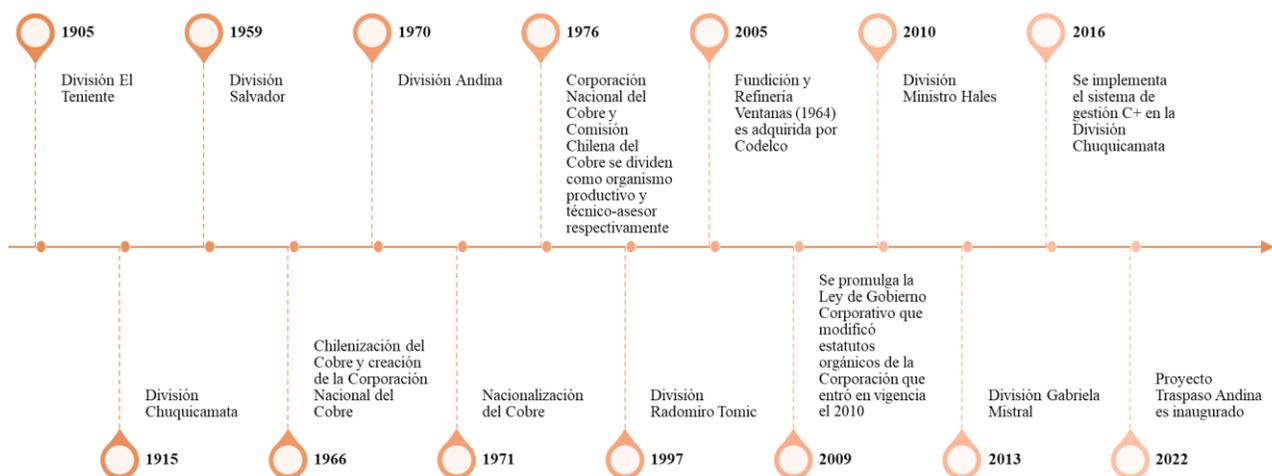
Este trabajo está comprendido por tres secciones principales: Introducción, Resultados, y Discusión y Conclusiones. En el primer capítulo se abordan los temas que contextualizan el trabajo realizado, especificando las problemáticas y objetivos, muestran los antecedentes y la metodología utilizada. En el segundo capítulo, Resultados, se muestran los hallazgos logrados en materia de análisis y también explicando las limitaciones del estudio. Por último, en Discusión y Resultados, se finaliza el informe con la interpretación de los resultados, discutiendo su impacto y trascendencia, cómo las limitaciones pueden trabajarse en posteriores estudios y recomendaciones de trabajos que pudiesen resultar de utilidad en la materia.

## 1.2 Antecedentes Generales

### 1.2.1 Contexto de la Corporación Nacional del Cobre

La Corporación Nacional del Cobre (Codelco) es una empresa minera cuprífera de carácter estatal y autónoma, creada en 1966 a través de la Chilenización del cobre. Sin embargo, muchas de las actuales operaciones mineras tienen sus inicios de operaciones mucho antes (ver **Figura 1.1**). Ejemplos de esto son las Divisiones El Teniente, Chuquicamata y Salvador que iniciaron la explotación de mineral en los años 1905, 1915 y 1959 respectivamente (Codelco, 2022c).

**Figura 1.1: Línea de Tiempo de Codelco**



Fuente: Elaboración propia

Actualmente, la Corporación cuenta con una dotación propia de 18.076 personas tan solo en sus siete divisiones y la refinería y fundición Ventanas (Codelco, 2022d), sin incluir Casa Matriz ni las empresas contratistas que prestan servicios a Codelco (ver **Figura 1.2**).

**Figura 1.2: Divisiones y Operaciones Mineras**



Fuente: Codelco

Además, esta empresa es de suma importancia nacional en términos tecnológicos (el cobre tiene múltiples aplicaciones en diversas industrias tecnológicas) y económicos, ejemplo de esto es que en el 2021 Codelco generó cerca de US\$ 7.394 millones de excedentes<sup>3</sup>, uno de los valores más altos de los últimos años a pesar de las dificultades de la pandemia. Las razones de este alto valor, las explica Codelco en su Memoria Anual 2021: “sostuvimos los niveles de producción y ventas, sumado al relevante incremento del precio del cobre” (2022b, pág. 34).

### 1.2.2 Contexto de la División Andina

La División Andina es una operación minera que data de 1970 y está ubicada en Los Andes en la región de Valparaíso, a más de 3.000 metros de altura sobre el nivel del mar. Esta operación involucra una mina subterránea y una mina a rajo abierto donde el producto final es concentrado de cobre y molibdeno. Cuenta con una dotación propia de 1.424 trabajadores y en 2021 logró una producción de 177.216 toneladas métricas de cobre fino (Codelco, 2022b).

División Andina actualmente está siendo parte de una transformación corporativa y divisional que involucra proyectos y eventos en el mediano y largo plazo. En 2021 se inauguró Proyecto Traspaso, que requirió una inversión de US\$ 1.455 millones y 8 años de construcción, el cual es un domo que

---

<sup>3</sup> Excedentes: resultados antes del impuesto a la renta y de la Ley Reservada del Cobre (N° 13.196). Esta ley grava con el 10% el retorno por las ventas en el exterior del cobre y los subproductos (como molibdeno, plata, oro, entre otros).

busca dar continuidad a las operaciones por 30 años más, de manera más sustentable ambientalmente al disminuir las emisiones de material particulado y energéticamente al reducir el consumo energético de fuentes externas. Para el año 2024 se proyecta el cierre de operaciones de la mina subterránea (no confundir con cierre de mina) para así enfocar todos los esfuerzos en la mina a rajo abierto y Proyecto Traspaso (Prensa Codelco, 2022).

Por otro lado, en la División se ha integrado al sistema de gestión C+, el cual es una adaptación, según las necesidades de Codelco, de los principios de *Lean Management*, el cual es una transformación evolutiva de *Lean Manufacturing* lo que se explica más adelante.

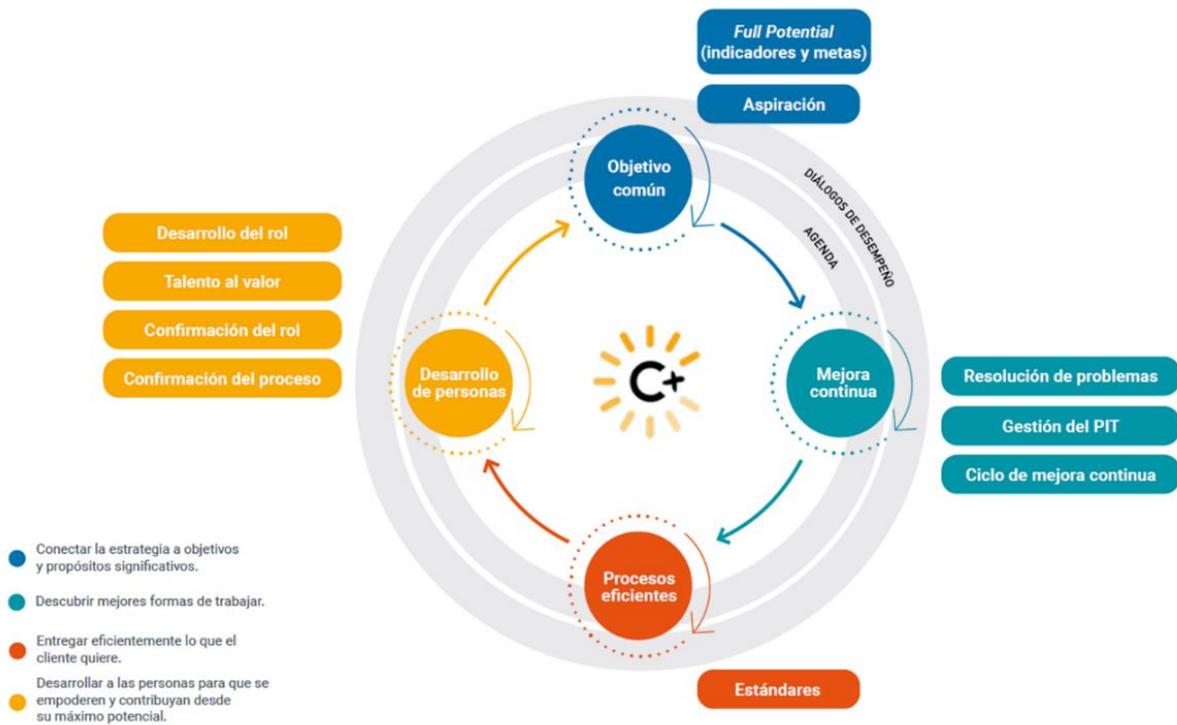
### 1.2.3 Sistema de Gestión C+ y Herramientas Lean

El sistema de Gestión C+ nació como un proyecto corporativo con foco en la excelencia operacional a través de herramientas de *Lean Management* para la mejora continua. Comenzó en la División Chuquicamata en el año 2016 y actualmente es un pilar fundamental de las funciones dentro de la Corporación Nacional del Cobre.

El sistema se basa en el ciclo de Deming de cuatro etapas (*Plan-Do-Check-Act*) pero adecuado a las operaciones mineras involucradas en el día a día (ver **Figura 1.3**). En Codelco, estas etapas son: objetivo común, mejora continua, procesos eficientes y desarrollo de personas. En cada etapa existen objetivos específicos y herramientas para que cada etapa sirva a la excelencia operacional en todos los niveles jerárquicos de la corporación. Al utilizar herramientas de *Lean Management* que es una evolución de *Lean Manufacturing* que combina gestión y herramientas de mejora, estas son utilizadas recurrentemente en el día a día por parte de los trabajadores de Codelco y de las empresas contratistas que prestan servicios.

Estos sistemas de gestión, *Lean Manufacturing*, *Lean Management* o *Lean Six Sigma* (como se verá más adelante), se basan en los Principios *Lean* que están orientados a reducir al máximo los desperdicios en cada paso de los procesos productivos de una empresa y que nació en Japón, en Toyota Motor Company como una necesidad de aumentar la eficacia, eficiencia y la competitividad en el mercado, creando así el Sistema de Producción Toyota o TPS por sus siglas en inglés (N & S, 2011).

Figura 1.3: Sistema de Gestión C+



Fuente: Codelco

#### 1.2.4 Principales Problemáticas del Contexto y el Proceso

Dentro de las principales problemáticas de la planta concentradora que justifican este informe se encuentran principalmente:

- Desorden presente en la planta concentradora causado por la actividad productiva.
- Muchas horas destinadas a mantenimientos programados y no programados.
- Múltiples áreas y empresas contratistas, lo que implica dificultades para generar instancias de mejora y acuerdos en cuanto a temas operacionales y de mantenimiento.
- Dificultades para seguir un mantenimiento orientado a la reducción en tiempos debido a complejidades presentes y factores que se deben considerar al momento de ejecutar una mantención.
- Inexistencia de utilización de métricas Seis Sigma y falta de herramientas y recursos estadísticos para identificar las causas de posibles procesos fuera de control.

- Transformación institucional a través de la implementación de nuevas prácticas (Codelco C+ es una de ellas como también la transformación en infraestructura a través del Proyecto Traspaso Andina).

Estos problemas, representan los principales desafíos en términos operacionales y su impacto es de suma relevancia puesto que la planta concentradora cumple un rol clave en la producción de cobre y molibdeno. Para ello, se presentan en los siguientes capítulos, análisis de procesos clave, actividades realizadas en torno a herramientas *Lean* y las principales perspectivas aprendidas con el fin de lograr una propuesta completa y con base en el estudio de datos cuantitativos.

### 1.3 Objetivos y Descripción General del Proyecto

En este apartado, se especifican los objetivos del informe los cuales se clasifican en dos tipos: general y específicos. El objetivo general es de carácter global y detalla el fin principal de este trabajo. En cambio, los objetivos específicos, detallan los objetivos secundarios que se enmarcan y tienen relación con la metodología a seguir, principalmente basados en las herramientas *Lean* y Seis Sigma.

#### 1.3.1 Objetivo General

Definir una propuesta de mejora del proceso de moliendas de planta concentradora, que permita reducir la variabilidad de tonelaje de tratamiento (o producción), para optimizarlo de tal manera de que se mejore la calidad en base a características relevantes para el cliente (interno y externo).

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir puntos críticos en *layout* del área de moliendas de la planta concentradora para ordenar espacios de trabajo, mejorar la seguridad de las áreas y aumentar la eficiencia y eficacia de las operaciones.
- Establecer las posibles causas que originan mayores tiempos de mantenimiento y/o procesos junto con la identificación de desperdicios en el sistema general.
- Identificar las interacciones, flujos, entradas y salidas en la cadena/sistema y que generan valor para el cliente (interno o externo).

- Determinar nivel Sigma del proceso de moliendas (MSAG y MUN2) y las causas asignables que pudiesen causar un proceso fuera de los límites de control en base a variables de calidad asociadas.
- Proponer un modelo que logre mejorar el proceso en cuanto a métricas Seis Sigma dentro del sistema de gestión C+.
- Estandarizar la metodología para ser aplicada en otras áreas operativas de la planta.

### 1.3.3 Justificación del Tema

La justificación del tema del presente informe yace en la necesidad de implementar herramientas de *Lean Manufacturing* en la División Andina de manera eficiente y proponer un modelo de mejora continua desde un enfoque Seis Sigma con fundamento en las problemáticas mencionadas anteriormente.

Este trabajo se enmarca en un contexto de desarrollo de la mejora continua y procesos eficientes, con miras hacia el objetivo común definido en la Corporación. Para ello, se busca lograr presentar el proceso de manera sistemática entendiendo los factores más relevantes que influyen en él a través de métodos probados y exitosos como lo son las herramientas de *Lean Manufacturing*.

Por otro lado, se añade la necesidad por parte de la Dirección de Excelencia Operacional perteneciente a la Gerencia de Operaciones, la identificación de brechas y causas asignables (en caso de procesos fuera de control) de procesos fuera de control a través de análisis estadísticos. Además, si se toma en cuenta que la estrategia divisional del 2017 buscaba lograr 92 ktpd (miles de toneladas diarias de tratamiento de mineral) para el 2021 como compromiso (Codelco - División Andina, 2021), el valor real logrado fue de 70 ktpd (Codelco - División Andina, 2022b). En cuanto para el 2022, lo proyectado es de 83 ktpd (tratamiento de mineral) y 201 ktmf (miles de toneladas métricas finas) de producción (Codelco - División Andina, 2021). En base a estas proyecciones, este trabajo busca ser una ayuda para disminuir las brechas de tratamiento y/o productivas desde el área de moliendas para que División Andina pueda igualar o superar el compromiso para este año.

Por último, desde el punto de vista de aporte profesional, se considera el generar una estandarización que permita aplicar y replicar la metodología Seis Sigma en otras áreas operativas de la División Andina.

## 1.4 Descripción del Contexto

### 1.4.1 Descripción General del Proceso de Obtención del Cobre

El proceso de obtención del cobre implica en primera instancia un trabajo de exploración geológica que tiene como fin el recabar datos e identificar si el mineral tiene la cantidad y calidad necesaria para iniciar una explotación en un yacimiento a largo plazo. En esta etapa se realizan estudios donde se utilizan mapas satelitales para elaborar curvas de nivel y explorar el terreno, se realiza observación directa y se utilizan drones equipados para recopilar datos. La exploración es realizada por geólogos que investigan, observan en terreno y analizan los datos de sondajes del subsuelo para luego realizar una interpretación de los datos y determinar la viabilidad de la operación minera.

Es muy importante saber el tipo de mineral de cobre, ya que este determinará si la mina será subterránea (como División El Teniente) o a rajo abierto (como División Chuquicamata). En el caso de la División Andina, esta cuenta con la presencia de ambos tipos de mina.

Existen dos tipos de mineral de cobre: sulfurado y oxidado. Si es sulfurado el mineral, el yacimiento es explotado a través de una mina subterránea porque este se encuentra a mayor profundidad. En el caso contrario, si este es oxidado, se construye una mina a rajo abierto debido a su proximidad con la superficie.

El proceso de obtención del cobre requiere de la extracción del mineral que consta de tres etapas secuenciales:

- Tronadura: se hace uso de explosivos o se hidrofractura el macizo rocoso procurando la uniformidad en el fracturamiento de la roca.
- Carguío de roca: el mineral tronado y fracturado se deposita en camiones de extracción a través de palas mecánicas optimizando la capacidad, tiempo y energía de dichos camiones.
- Transporte: los camiones de extracción transportan las rocas con mineral de cobre hasta la siguiente etapa que es chancado.

Luego de la extracción, se reduce el tamaño de la roca por medio de chancadores y molinos. El objetivo de estas máquinas es reducir el diámetro de la roca hasta asegurar un tamaño pequeño que cumpla con las condiciones de proceder a la siguiente parte del proceso. Muchas veces es requerido que se hagan uso de varios chancadores y molinos para asegurar este objetivo (Codelco, 2022e).

La siguiente etapa depende del tipo de mineral. Cuando el mineral es sulfurado, se sigue moliendo la roca en molinos (en División Andina existen cuatro molinos principales que se especifican en la siguiente sección) hasta obtener un concentrado de cobre que pasa a un proceso flotación donde se separa el cobre de otras sustancias (como el molibdeno) y posteriormente a uno de fundición a altas temperaturas. En División Andina no hay una fundición ni refinería por lo que se transporta a Ventanas<sup>4</sup> en Valparaíso. En la fundición, el material fundido se vierte en una rueda de moldeo de la que se obtienen ánodos de cobre. Luego estos ánodos se introducen en celdas electrolíticas, en la refinería, donde se obtienen cátodos de alta pureza lo que se conoce como electrorrefinación. En el otro caso, cuando el mineral es oxidado, desde el chancador se procede a un proceso llamado lixiviación (biolixiviación si se realiza con bacterias). Para llevar a cabo este proceso, el material chancado se riega con una solución que mezcla agua con ácido sulfúrico y que permanece así por varios días hasta lograr sulfato de cobre. El sulfato de cobre luego se lleva a piscinas de electroobtención donde el producto final son cátodos de cobre de alta pureza gracias a la electrólisis. En ambos procesos, derivados del tipo de mineral, el resultado final son cátodos de alta pureza con un 99,99% de cobre que pesan entre 70 y 80 kilogramos (Codelco, 2022f). El proceso culmina cuando los cátodos son llevados a puerto donde los barcos exportan el cobre, principalmente, a Estados Unidos, China y Europa. Finalmente, es menester mencionar que la División Andina también produce molibdeno, el cual es un subproducto del proceso productivo principal el cual tiene aplicaciones en metalurgia (aleaciones), lubricantes industriales, catalizadores en la industria petrolera, como pigmento, en electrónica en la fabricación de transistores, entre otras.

#### 1.4.2 Descripción General de Moliendas SAG y Unitaria 2

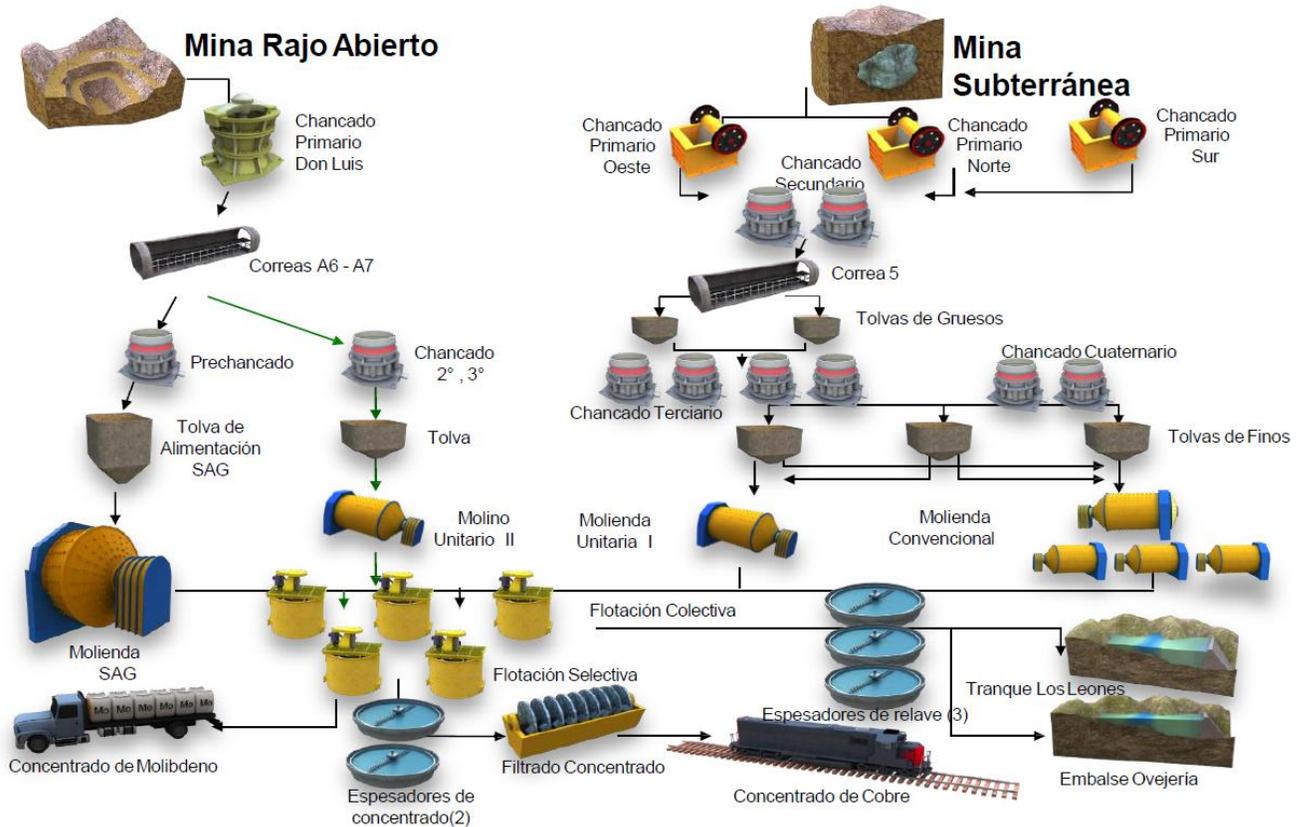
Existen cuatro moliendas en la División Andina: SAG, convencional, unitaria 1 y unitaria 2. Para efecto de este informe se trabajó en base a MSAG y MUN2. Ambas moliendas, se alimentan del mineral de cobre proveniente de la mina a rajo abierto a diferencia de la molienda convencional y molienda unitaria 1 que se alimentan de lo que proviene de la mina subterránea. El objetivo en ambas moliendas es lograr granulometrías cercanas a los 180 micrones. En la **Figura 1.4**, se muestran las moliendas en su contexto del proceso productivo.

---

<sup>4</sup> La Ley 19.993 obliga a Codelco a fundir los minerales de Enami (Empresa Nacional de Minería) en Ventanas. Cualquier cambio en esta materia implicaría una modificación en dicha ley.

Luego de pasar por el chancado y molienda, se procede al proceso de flotación, espesamiento de concentrados (cobre y molibdeno) y filtración. El proceso finaliza en el transporte de concentrado de cobre y molibdeno a través de camiones (a distintas partes del país) y tren (a Ventanas) respectivamente.

**Figura 1.4: Proceso Productivo de División Andina con Énfasis en Chancado y Molienda**



Fuente: Estándares Operacionales – Gerencia de Plantas (Codelco)

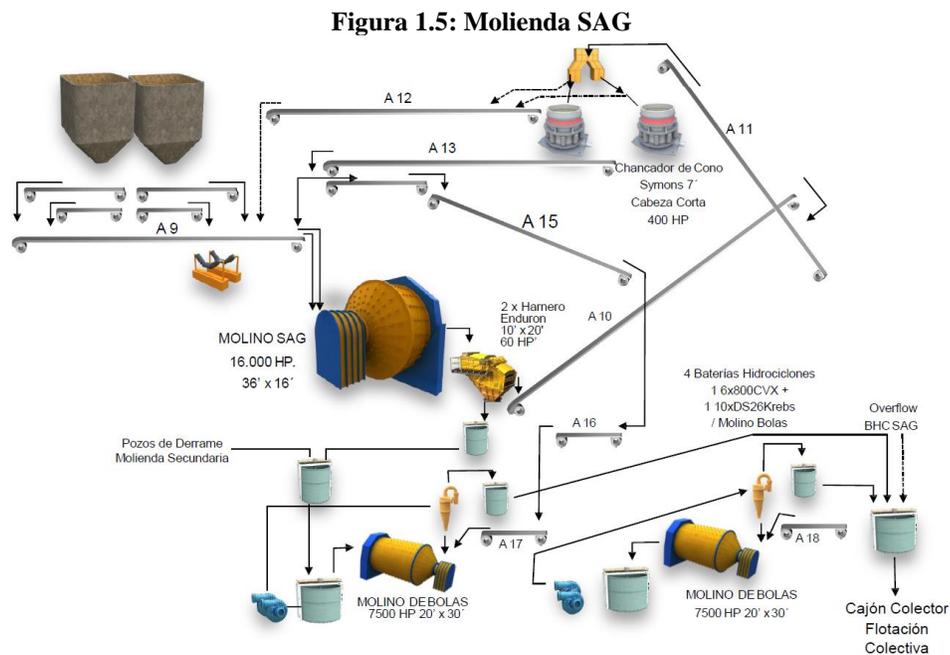
- **Molienda SAG:**

La molienda SAG cuenta con múltiples equipos (ver **Figura 1.5**) donde la máquina principal es el molino semiautógeno, mejor conocido como molino SAG. Este molino de gran tamaño y capacidad

(ver **Tabla 1.1**) tritura la roca proveniente del prechancado y mezcla el mineral con agua y cal<sup>5</sup>. El término semiautógeno significa que el mineral se reduce por el movimiento de las mismas rocas que ingresan al molino que chocan entre sí y con bolas de acero dentro de la máquina mientras gira (Codelco, 2019).

Este tipo de molino es más eficiente que el molino convencional, ya que requiere menos equipos de chancado y molienda, acortando estos procesos, a lo que se suma también un menor consumo de energía en el proceso.

Además, existen tolvas, donde se deposita el mineral proveniente del prechancado para luego pasar por correas transportadoras hasta el molino. Luego los harneros clasifican el mineral según el diámetro y se envía a pozos de derrame o se reprocessa en chancadores de cono hasta alcanzar el diámetro necesario para pasar a la siguiente etapa que contempla dos molinos de bolas e hidrociclones. El estándar operacional indica un llenado total entre un 27% y 28% del cual 14,5% corresponde al llenado de bolas de acero.



Fuente: Estándares Operacionales – Gerencia de Plantas (Codelco)

<sup>5</sup> Cal (CaO): en minería se utiliza como un regulador de pH evitando la contaminación ambiental causada por la acidez, regula la generación de gases cianurados, permite la obtención de concentrados de cobre con mayor ley y estabiliza procesos optimizando los consumos de energía eléctrica. Al ser un recurso muy útil, Codelco se autoabastece de este insumo (Minería Chilena, 2009).

**Tabla 1.1: Principales Equipos del Proceso de Molienda SAG**

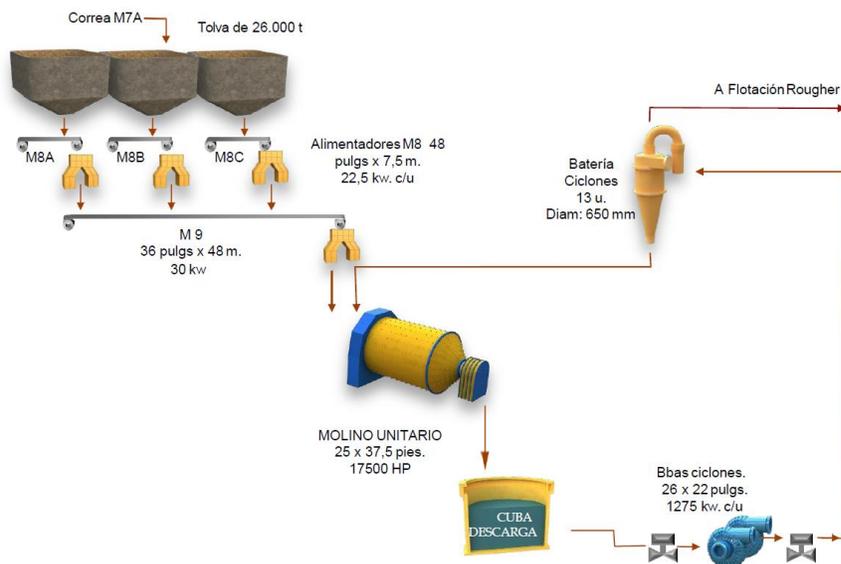
| Equipo                  | Marca/Modelo                   | Cantidad | Especificaciones Técnicas   |
|-------------------------|--------------------------------|----------|---|
| Tolva SAG               | -                              | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Capacidad: 34.000 toneladas</li> </ul>   |
| Correa A9               | -                              | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dimensiones (ancho-largo): 1,23 metros x 166 metros</li> <li>▪ Potencia: 270 HP</li> </ul>   |
| Molino SAG              | Siemens                        | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dimensiones (ancho-largo): 4,88 metros x 10,92 metros</li> <li>▪ Potencia: 16.000 HP</li> <li>▪ Rendimiento: 2.011 toneladas por hora</li> </ul> |
| Harnero SAG 1           | Enduron                        | 2        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dimensiones (ancho-largo): 3,05 metros x 6,10 metros</li> <li>▪ Potencia: 60 HP</li> <li>▪ Rendimiento: 473 toneladas por hora</li> </ul>        |
| Chancador Pebbles 1 y 2 | Symons/7' cabeza corta 400 HP. | 2        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Potencia: 400 HP</li> <li>▪ Rendimiento: 473 toneladas por hora</li> </ul>   |

Fuente: Full Potential 2021 (Codelco)

▪ Molienda Unitaria 2:

La molienda unitaria 2 es aún más sencilla y moderna en diseño que la molienda SAG (ver **Figura 1.6**). Esta consta de tres tolvas de 26.000 toneladas cada una (ver **Tabla 1.2**) que se alimentan del mineral triturado de los chancadores secundario y terciario. Luego el material proveniente de las tolvas, pasan a través de tres alimentadores que depositan el mineral en una correa transportadora que lo lleva hasta otro harnero que lo destina hasta el molino unitario, luego a una cuba de descarga y posteriormente a una batería de ciclones (separadores de partículas ciclónicos) a través de bombas para separar minerales según diámetros (granulometría). Si se cumple con el diámetro especificado, la batería de ciclones lo envía a flotación. En caso contrario lo reprocesa enviándolo al molino. El molino unitario 2 es el más moderno de los equipos, es más eficiente en comparación a los demás y con menores costos operativos (Minería Chilena, 2012). Es muy importante que se cumplan con las especificaciones de granulometría debido a que esto mejora considerablemente la eficiencia en los procesos siguientes como concentración y flotación donde los procesos químicos tienen un mejor desempeño cuando el proceso de molienda se ejecuta correctamente.

**Figura 1.6: Molienda Unitaria 2**



Fuente: Estándares Operacionales – Gerencia de Plantas (Codelco)

**Tabla 1.2: Principales Equipos del Proceso de Molienda Unitaria 2**

| Equipo               | Marca/Modelo         | Cantidad | Especificaciones Técnicas  |
|----------------------|----------------------|----------|--|
| Tolva MUN2           | -                    | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Capacidad: 26.000 toneladas</li> </ul>  |
| Alimentador M8A aM8C | Conveyor E           | 3        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones (ancho-largo): 1,22 metros x 7,5 metros</li> <li>Rendimiento (diseño): 2.488 toneladas por hora</li> </ul>  |
| Correa M9            | Conveyor E           | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones (ancho-largo): 0,91 metros x 48 metros</li> <li>Rendimiento (diseño): 1.073 toneladas por hora</li> </ul>   |
| Molino unitario      | Metso/Anillo Rozante | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones (ancho-largo): 7,62 metros x 11,43 metros</li> <li>Potencia: 17.500 HP</li> <li>Rendimiento: 1.073 toneladas por hora</li> </ul>                                |
| Bombas ciclones      | -                    | 2        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rendimiento (diseño): 5.900 toneladas por hora</li> </ul>   |
| Batería ciclón       | CAVEX/650CVX         | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones: Apex<sup>6</sup> ø160-170 mm, Vortex ø320-330 mm</li> <li>Rendimiento: Rebalse 1.073 toneladas por hora</li> <li>Descarga: 4.827 toneladas por hora</li> </ul> |
| Batería ciclón       | FLS/Gmax26           | 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones: Apex ø178-188 mm, Vortex<sup>7</sup> ø305-315 mm</li> </ul>  |

Fuente: Full Potential 2021 (Codelco)

<sup>6</sup> Apex (o Underflow): orificio de la batería ciclón por donde sale el concentrado (flujo de mayor peso)

<sup>7</sup> Vortex (u Overflow): tubería de salida de la suspensión diluida (flujo de menor peso)

## 1.5 Revisión Bibliográfica

Dentro de la revisión bibliográfica para el desarrollo y estudio, se utilizaron principalmente libros académicos, documentación oficial de Codelco, revisión de la página oficial de American Society for Quality y *papers* para validar ciertos puntos de la discusión. Para el estudio del método 5S se revisó el libro *Gemba Kaizen: A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy* de Masaaki Imai y la página oficial de American Society for Quality (ASQ). Para *Single-Minute Exchange of Die* (SMED) y *Value Stream Mapping* (VSM) también se revisó la página oficial de ASQ junto con material interno de Codelco, específicamente de Academia C+.

En cuanto a Seis Sigma, además de revisar la sección de ASQ, se revisaron los libros *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma* de Humberto Gutiérrez Pulido y Román de la Vara Salazar, y el libro *Lean Six Sigma Pocket Toolbook* de la editorial McGraw-Hill. Finalmente, se revisaron *papers* para el análisis estadístico y tesis realizadas en la División Andina o con relación al Sistema de Gestión C+.

## 1.6 Marco Teórico

### 1.6.1 Método 5S

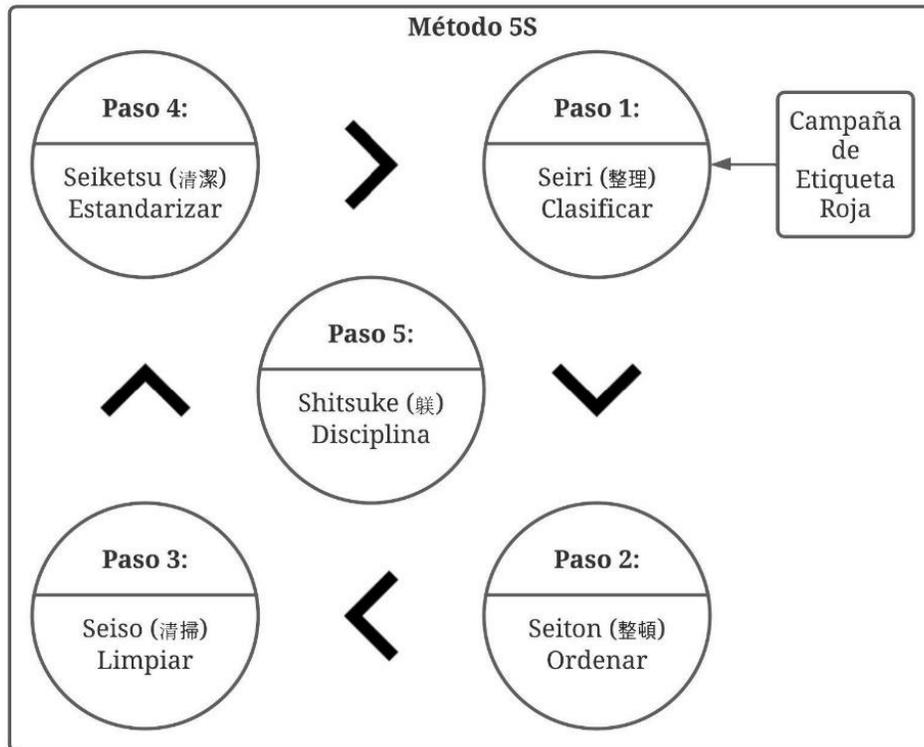
Un método comúnmente utilizado como punto de partida en *Lean Manufacturing* es el Método 5S. Es llamado así según las iniciales en japonés de los cinco pasos que involucra: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke (ver **Figura 1.7**). Estos cinco pasos tienen el objetivo de mejorar la organización en los espacios de faena a través del trabajo intensivo en un contexto de manufactura y producción.

Se considera el primer paso para la mejora de la calidad<sup>8</sup> debido a que es el método más simple y que involucra un menor costo de mejora mas no deja de tener una alta relevancia en el corto, mediano y largo plazo si se ejecuta bien. Dentro de los aspectos más importantes de este método y uno de los principios fundamentales es la disciplina y la constancia en la aplicación de los estándares del método.

---

<sup>8</sup> El método 5S se utiliza en los laboratorios de nano-cybernetic biotrek del Instituto Tecnológico de Massachusetts donde se inventan tecnologías disruptivas para dispositivos nanoelectrónicos.

Figura 1.7: Pasos del Método 5S



Fuente: Elaboración propia

Según Imai: “Una falta de 5S en el gemba<sup>9</sup> podría ser considerado como un indicador visual de ineficiencia, muda<sup>10</sup>, insuficiente autodisciplina, moral baja, calidad pobre, altos costos, y una inhabilidad para conocer las condiciones de entrega. Proveedores que no practican 5S no serán tomados en serio por potenciales clientes. Estos cinco puntos de housekeeping<sup>11</sup> representan un punto de partida para cualquier compañía que busca ser reconocida como un fabricante responsable elegible para un estatus de clase mundial” (2012, pág. 35).

La esencia del Método 5S es seguir lo que se ha acordado por parte de los trabajadores que deben seguir las reglas establecidas en cada paso donde prima el bajo coste de mejora y el sentido común, lo que al mismo tiempo no involucra la gestión de nuevas tecnologías y teorías. La **Tabla 1.3**, **Tabla 1.4**, **Tabla 1.5**, **Tabla 1.6** y la **Tabla 1.7** muestran las descripciones de manera detallada de cada paso con las acciones recomendadas a ejecutar y los efectos esperados de la etapa en cuestión.

<sup>9</sup> Gemba: término japonés utilizada para referirse al lugar donde ocurre la manufactura y/o producción.

<sup>10</sup> Muda: palabra de origen japonés usada para referirse a desperdicios.

<sup>11</sup> Housekeeping: método industrial para la organización y orden en áreas de trabajo.

**Tabla 1.3: Paso 1 (Seiri – Clasificar)**

|                     |   |
|---------------------|---|
| Descripción         | Distingue y determina entre los ítems necesarios e innecesarios en el área productiva, con el objetivo de descartar y disponer de cada uno de ellos. Por lo general, las áreas de las plantas de manufactura están llenas de máquinas no usadas, herramientas mal ubicadas como también suministros, estantes, contenedores y escritorios fuera de orden. |
| Acciones a ejecutar | Se debe establecer un número límite de ítems necesarios en esta etapa. Una regla útil en esta etapa es eliminar todo elemento que no se vaya a utilizar dentro de un periodo futuro de 30 días. Hacer uso de etiqueta roja (descrito a continuación).   |
| Efecto              | Este proceso busca desarrollar la autodisciplina como también aumentar la capacidad de los empleados para trabajar de manera eficaz.  |

Fuente: Elaboración propia con base en Gemba Kaizen - A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy - Masaaki Imai

**Tabla 1.4: Paso 2 (Seiton – Ordenar)**

|                     |  |
|---------------------|--|
| Descripción         | Organizar todos los elementos restantes después de Seiri de una manera ordenada y poner las cosas necesarias en orden para que puedan ser de fácil acceso y estén disponibles. En otras palabras, significa clasificar los artículos según su uso y ordenarlos de acuerdo con un criterio de reducción de tiempo y esfuerzo determinado por cada área. El objetivo es que las herramientas deberían ser encontradas sin realizar mucho esfuerzo, debe ser fácil poder tomarlas y dejarlas en su respectivo sitio.  |
| Acciones a ejecutar | Designar a cada elemento un nombre, ubicación y volumen establecido. También se especifica el máximo número de ítems permitidos por estantes y secciones. El espacio en el suelo se puede delimitar para almacenar distintos tipos de elementos derivados del trabajo en proceso. Esto se puede lograr a través de delimitaciones con pintura y señaléticas dejando claramente especificado el número permitido para el almacenamiento de cada tipo de elemento. Por otro lado, los muros pueden ser enumerados usando designaciones con códigos entendibles por los operadores que ocupan las instalaciones y los pasillos deben ser correctamente demarcados ya que debe ser usado solo para tránsito y nada debe estorbar allí. |
| Efecto              | Provee un conveniente, seguro y ordenado lugar para cada cosa, y busca mantenerlo allí hasta su uso. Este paso también asegura un flujo mínimo de elementos en el área de trabajo de estación a estación según una base FIFO <sup>12</sup> (first-in-first-out) según Teoría de Colas <sup>13</sup> .  |

Fuente: Elaboración propia con base en Gemba Kaizen - A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy - Masaaki Imai

**Tabla 1.5: Paso 3 (Seiso – Limpieza)**

|                     |   |
|---------------------|---|
| Descripción         | Este paso involucra mantener máquinas y ambientes de trabajo limpios. Un operador que limpia una herramienta puede encontrar muchos mal funcionamientos y desperfectos debido a que cuando algo está sucio es difícil identificar cualquier problema que pueda estar desarrollándose.   |
| Acciones a ejecutar | Se debe limpiar todo, tanto herramientas como espacios de trabajo, removiendo manchas, restos de suciedad, y erradicar las fuentes de suciedad de ser posible. Se monitorean y restauran las condiciones de trabajo durante la limpieza por parte de los responsables. También se debe limpiar el ambiente de trabajo, máquinas, herramientas, pisos y muros. |
| Efecto              | El efecto de este paso es el aprendizaje para los operadores debido a que ellos pueden hacer muchos descubrimientos útiles mientras limpian máquinas y reportarlos de ser necesario.  |

Fuente: Elaboración propia con base en Gemba Kaizen - A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy - Masaaki Imai

<sup>12</sup> FIFO (first-in-first-out): significa de manera simple que el primer elemento en una fila-columna es el primero en salir de ella.

<sup>13</sup> Teoría de Colas: campo de estudio matemático que estudia sistemas con enfoque en la optimización de las filas o colas de este.

**Tabla 1.6: Paso 4 (Seiketsu – Estandarizar)**

|                     |   |
|---------------------|---|
| Descripción         | Se extiende el concepto de limpieza al área de trabajo y uno mismo además de practicar continuamente los tres pasos anteriores. Se establece el estándar, entrenamiento para conseguir los objetivos del 5S y cómo mantenerlo en funcionamiento. Se debe asegurar que el trabajo en las etapas anteriores continúe todos los días en base a lo acordado. Se entiende que, si no se hace un esfuerzo por continuar con estas actividades, la situación volverá pronto al punto de partida. |
| Acciones a ejecutar | Hacer limpieza y chequear rutina de esta. Mantener el uso de ropa de trabajo adecuada, gafas de seguridad, guantes y zapatos de seguridad. Realizar aseo para lograr un entorno de trabajo limpio y saludable. Deben determinar (los directivos o líderes) la frecuencia de los pasos previos, quién debe participar en ellos y responsabilizarse. Opcionalmente, esto puede formar parte del programa de planificación anual.  |
| Efecto              | El despliegue por parte de la dirección en ámbitos de aplicación de sistemas, procedimientos y estándares, garantizan la continuidad de los pasos predecesores. El compromiso, apoyo e implicación de la dirección en las 5S son sumamente esenciales para el éxito de cada paso.   |

Fuente: Elaboración propia con base en Gemba Kaizen - A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy - Masaaki Imai

**Tabla 1.7: Paso 5 (Shitsuke – Disciplina)**

|                     |  |
|---------------------|--|
| Descripción         | La autodisciplina se debe practicar y debe hacerse de esta un hábito con el fin de comprometerse con 5S al mismo tiempo que se establecen estándares. Estandarizar los cuatro pasos predecesores hacen que el proceso (ciclo) no termine y se pueda mejorar. |
| Acciones a ejecutar | Para el final de este paso, los líderes de la aplicación del método debiesen haber establecido los estándares de cada paso y hacer que se sigan dichos estándares al incluir formas para evaluar el progreso en cada uno de los cinco pasos.                 |
| Efecto              | Se desarrolla el hábito de la rutina de mantenimiento y esfuerzos por nuevas mejoras (al ciclo). Las personas que practican los cuatro pasos anteriores adquieren poco a poco el hábito de hacerlas parte de su trabajo diario adquiriendo disciplina.       |

Fuente: Elaboración propia con base en Gemba Kaizen - A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy - Masaaki Imai

- Campaña de etiqueta roja: el método 5S por lo general comienza con una campaña de etiqueta roja. Aquí se designan miembros para colocar estas etiquetas sobre los ítems que ellos crean innecesarios. Al final de la campaña, se podrá tener una buena idea de la cantidad de elementos innecesarios, suministros mal ubicados, trabajos en proceso y otros desperdicios. Uno de los beneficios de aplicar este sistema, es lograr corregir las acciones que hicieron posible los desperdicios y desorden en el área de trabajo. También es útil para mejorar la flexibilidad y liberar espacio en el uso de las áreas de trabajo. Es importante mencionar que también es aplicable al uso de áreas más pequeñas como, por ejemplo, escritorios y cubículos. Cabe destacar que el uso de estas etiquetas/tarjetas ya se aplican en el ámbito minero como es el caso de Minera Escondida de BHP Billiton donde existe un estándar, se define el proceso sobre la correcta utilización de estas y se establecen las responsabilidades en la ejecución (Minera Escondida, 2013).

Para introducir el método con éxito, se debe preparar moral y mentalmente a los trabajadores antes de implementar 5S. Esto se debe principalmente a la resistencia al cambio y se deben establecer

instancias de diálogo para dar a conocer los beneficios en el corto, mediano y largo plazo. Estas instancias también resultan útiles para conocer avances, retroalimentación por parte de los trabajadores y sugerencias de cambio en la aplicación. Para una mejor aplicación del método se recomienda realizar:

- Reuniones de información: donde se especifican los detalles del paso a ejecutar.
- Reuniones de planificación: donde se detallan las acciones a ejecutar y el cómo se realizarán.
- Reuniones de comunicación: donde se informan los requerimientos para el cumplimiento por etapa.

Para finalizar con la metodología de este método, cabe señalar que existen cinco maneras de valorar la calidad de 5S de manera cualitativa en cada etapa:

- Autoevaluación por cada área o responsable de esta.
- Evaluación por un experto o empresa consultora.
- Evaluación por un superior.
- Combinación de los tres puntos anteriores.
- Competencia entre grupos gembu (de áreas de trabajo).

### 1.6.2 Value Stream Mapping (VSM)

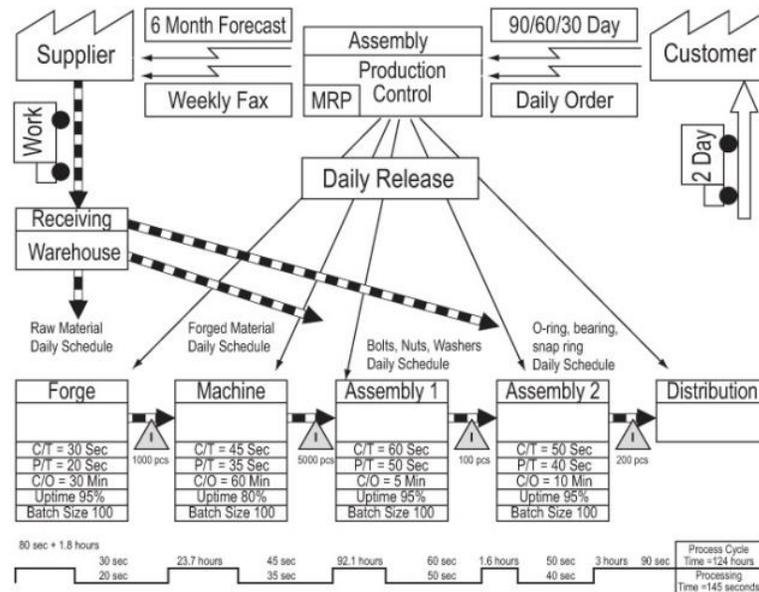
Un *Value Stream Mapping* se utiliza para documentar los pasos en un proceso productivo y ayuda a reducir tiempos de ciclos, identificar procesos que agregan y no agregan valor para el cliente ya sea interno o externo (American Society for Quality, 2022c). Consta de ocho pasos según la ASQ y siete según Lean Six Sigma Pocket Toolbook, las que aquí se presentan, las cuales son:

- Determinar productos individuales, servicios, o familia de productos.
- Diseñar el flujo del proceso.
- Agregar el flujo de material.
- Agregar el flujo de información.
- Recolectar datos y conectarlos con las cajas en el gráfico.
- Agregar procesos y los tiempos de espera en el gráfico.
- Verificar el mapa.

La **Figura 1.8** muestra la plantilla de un VSM que incluye a los clientes, proveedores, las interacciones y flujos de información y/o material (de entrada y salida), los tiempos de ejecución por

actividad y el takt time que es el tiempo medio de las actividades del proceso que tienen el objetivo de cumplir con las demandas de los clientes internos o externos. También se hace la distinción de que en un VSM se indican aquellas actividades que agregan y desagregan valor para los clientes con el fin de identificar y posteriormente reducir o eliminar aquellas que restan valor.

**Figura 1.8: Visualización Gráfica de un VSM**



Fuente: Lean Six Sigma Pocket Toolkit

### 1.6.3 Single-Minute Exchange of Die (SMED)

*Single-Minute Exchange of Die* o simplemente SMED, es una herramienta de *Lean Manufacturing* que tiene como objetivo de disminuir, al mínimo posible, los tiempos de mantenimiento en áreas productivas. Se utiliza tanto para mantenimiento programado (aquellas que se adhieren a un plan de mantenimiento) como no programado, causado por averías o fallas por uso de máquinas.

Como muchas de las herramientas de *Lean Manufacturing*, esta se originó en la compañía Toyota Motor Company y su creador y precursor fue el ingeniero mecánico japonés Shigeo Shingo y ha tenido diversas adaptaciones según las variadas necesidades de las empresas, instituciones o actividades<sup>14</sup> en las que se aplican. La **Tabla 1.8** muestra cuatro etapas para la aplicación de SMED.

<sup>14</sup> Un ejemplo de esto es la competencia de Fórmula 1 donde SMED es utilizado por las escuderías para reducir los tiempos en los pits (o boxes).

**Tabla 1.8: Etapas de la Aplicación SMED en Operaciones de Mantenimiento**

| <b>Etapas</b>  | <b>Descripción</b>   |
|--|--|
| 1. Identificar actividades internas y externas       | En esta fase se identifican dos tipos de actividades de preparación al momento de un mantenimiento programado y reparación de una falla (o detención) no programada: internas y externas. El fundamento es que las actividades internas son aquellas que se realizan con la máquina en estado de detención y las externas con la máquina en funcionamiento. Otra interpretación es que las actividades externas son aquellas que se hacen paralelamente a la máquina en marcha y las internas no permiten esta condición (o al menos la rutina y/o protocolos han hecho creer esto último). Por lo general, las actividades internas involucran cambios de piezas, partes móviles de la máquina, líneas de alimentación de materia prima, entre otros. También resulta muy útil, para la siguiente fase, determinar los tiempos de cambio actuales (estimados o medidos) de las distintas operaciones. |
| 2. Transformar actividades internas en externas      | El objetivo aquí es lograr razonar, y especificar, acerca de aquellas actividades que se podrían ejecutar con la máquina en marcha permitiendo mejoras de tiempo (reducción de tiempo total) siempre que sea posible, de acuerdo con criterios realistas, de seguridad y alcanzables. Esta es una etapa de conversión o transformación de la categorización de las actividades.  |
| 3. Planificar y organizar las operaciones externas   | Esta etapa se fundamenta sobre la base de que las herramientas e insumos, que serán requeridas en las actividades externas, estén disponibles y sean accesibles al momento de una mantención de una máquina. Estos elementos requeridos se disponen de manera que estén a un lado de la máquina de manera ordenada. Para lograr esto, es necesario haber realizado las reparaciones de componentes a instalar en la máquina principal.   |
| 4. Ajustar tiempos de actividades internas al mínimo | La última fase implica establecer el tiempo de cada proceso de ajuste de modo que se logre el mínimo posible por máquina. Se considera que este tipo de procesos constituye entre el 50% y el 70% de las operaciones de preparación interna (Salazar López, 2019). Los métodos utilizados para lograr la reducción en tiempo son: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estandarizar características de sistemas de sujeción de elementos móviles.</li> <li>▪ Estandarizar operaciones del proceso relacionados a parámetros de calidad (del producto) de manera directa.</li> </ul> Se consideran importantes las labores que involucran mejoras tecnológicas y/o nuevas técnicas de ingeniería, ya que, ayudan a alcanzar el objetivo de la minimización de tiempos.  |

Fuente: Elaboración propia con base en ¿Qué es SMED en producción? – Ingeniería Industrial Online

Actualmente, Codelco define seis etapas (ver **Tabla 1.9**), en vez de cuatro como se presenta en la tabla anterior, para los talleres de SMED.

**Tabla 1.9: Etapas SMED Definidas en Codelco**

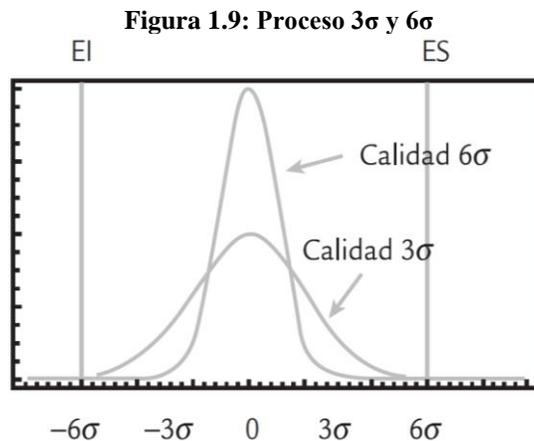
| <b>Etapas</b>  |
|--|
| 1. Medir el tiempo de la tarea   |
| 2. Determinar pasos internos y externos de la tarea                    |
| 3. Convertir las tareas internas en tareas externas cuando sea posible |
| 4. Eliminar el desperdicio interno                                     |
| 5. Eliminar el desperdicio externo                                     |
| 6. Estandarizar y mantener las mejores prácticas                       |

Fuente: Pre-Taller SMED – División Andina

#### 1.6.4 Six Sigma (Seis Sigma)

La metodología Seis Sigma<sup>15</sup> tiene sus orígenes en el año 1987 en la empresa Motorola con el objetivo de mejorar la calidad de sus productos electrónicos (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2013). Sus enfoques se orientan en mejorar el control y reducir la variación de los procesos productivos al eliminar las causas que producen errores (American Society for Quality, 2022b). En otras palabras, es una forma de mejorar los procesos continuamente. Se recomienda utilizar esta metodología cuando los problemas son complejos y los riesgos de la solución son altos (L. George et al., 2004).

Seis Sigma ( $6\sigma$ ) hace alusión a la variación poblacional de una variable de interés y que reflejan la capacidad de un proceso para cumplir las especificaciones o requerimientos técnicos y de calidad de un cliente y que, además, cumple con la condición de presentar 3,4 defectos por millón por oportunidades (DPMO) con un 99,99% de la curva de datos dentro de las especificaciones (ver **Figura 1.9**). Esto también se puede entender como el objetivo de Seis Sigma al buscar lograr 3,4 DPMO en un proceso determinado o también denominado el nivel óptimo.



Fuente: Control estadístico de la calidad y Seis Sigma – Gutiérrez Pulido H, de la Vara Salazar R

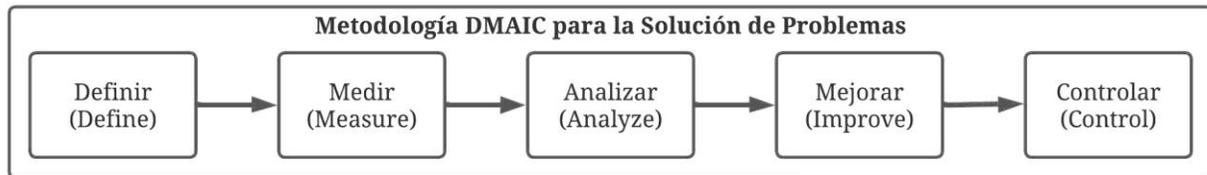
Existen variadas herramientas en la metodología Seis Sigma donde se mencionan: metodología DMAIC, 5S, VSM, gráficos de Pareto y de Ishikawa, entre otras. Los objetivos que tienen estas herramientas, principalmente, es encontrar las causas que ocasionan problemas o mantienen un proceso fuera de control. Para lograr esto, se presenta y detalla a continuación, la metodología

---

<sup>15</sup> Lean Six Sigma (o Lean Seis Sigma) tiene un enfoque en la reducción de residuos y en la eliminación de desperdicios dentro de procesos que no agregan valor en la producción.

DMAIC la que involucra cinco etapas para una mejora continua y se considera el método de ejecución de Seis Sigma (ver **Figura 1.10**).

**Figura 1.10: Cinco Pasos de la Mejora Seis Sigma**



Fuente: Elaboración propia

Cada etapa tiene su propósito específico y que se definen a continuación:

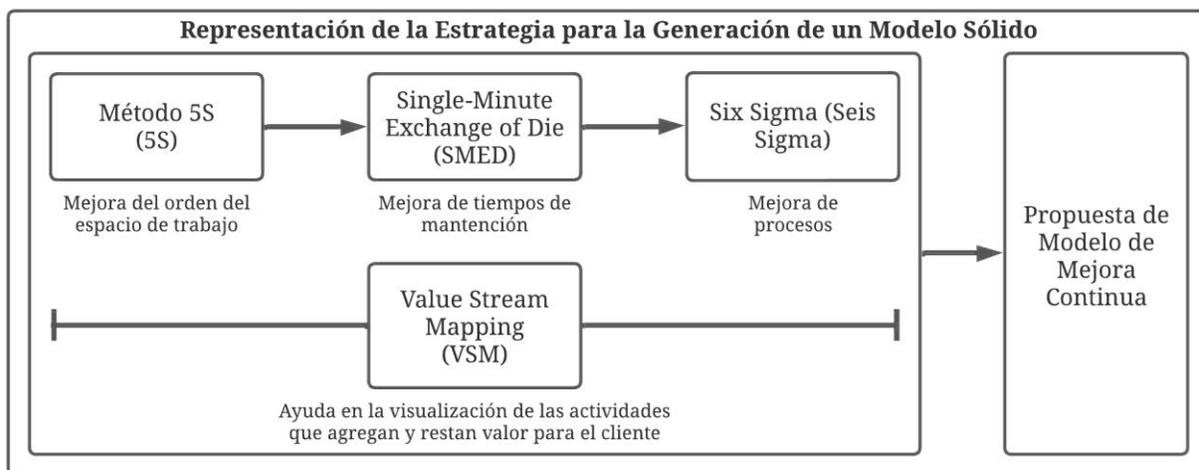
- Definir: establecer las métricas y el impacto de estas sobre el cliente con el fin de lograr que el equipo y su patrocinador lleguen a un acuerdo sobre el alcance, las metas, los objetivos financieros y de rendimiento de la mejora del proceso.
- Medir: comprender a fondo el estado actual del proceso en base a las métricas definidas y recopilar datos confiables sobre la velocidad, la calidad y/o los costos del proceso que serán de utilidad para exponer las causas subyacentes de los problemas.
- Analizar: identificar y verificar las causas que afectan las variables (fuentes de variación) clave de entrada y salida vinculadas a las metas de la implementación de mejora.
- Mejorar: aprender de planes piloto de soluciones seleccionadas y ejecutar la implementación a gran escala con base en las posibilidades y limitaciones intentando cumplir objetivos de la mejora.
- Controlar: completar el trabajo y entregar el proceso mejorado al propietario del proceso, con procedimientos para mantener las ganancias y motivaciones a largo plazo. Lo ideal es lograr mantener el proceso de mejora sobre las variables de calidad.

### 1.7 Estrategia de Aplicación, Metodología y Métodos Utilizados

La estrategia de aplicación para este trabajo se desarrolló según las bases metodológicas del control de calidad que ofrece Seis Sigma en conjunto con los métodos que ya son utilizados tanto por la Corporación, en otras áreas y Divisiones, como por aquellos que aplican *Lean Manufacturing* y *Lean Management* en diversas compañías. En la **Figura 1.11** se visualiza el flujo de aplicación de la

estrategia que se propone para la generación de un modelo sólido materializado en un documento estándar para su aplicación a otras áreas productivas.

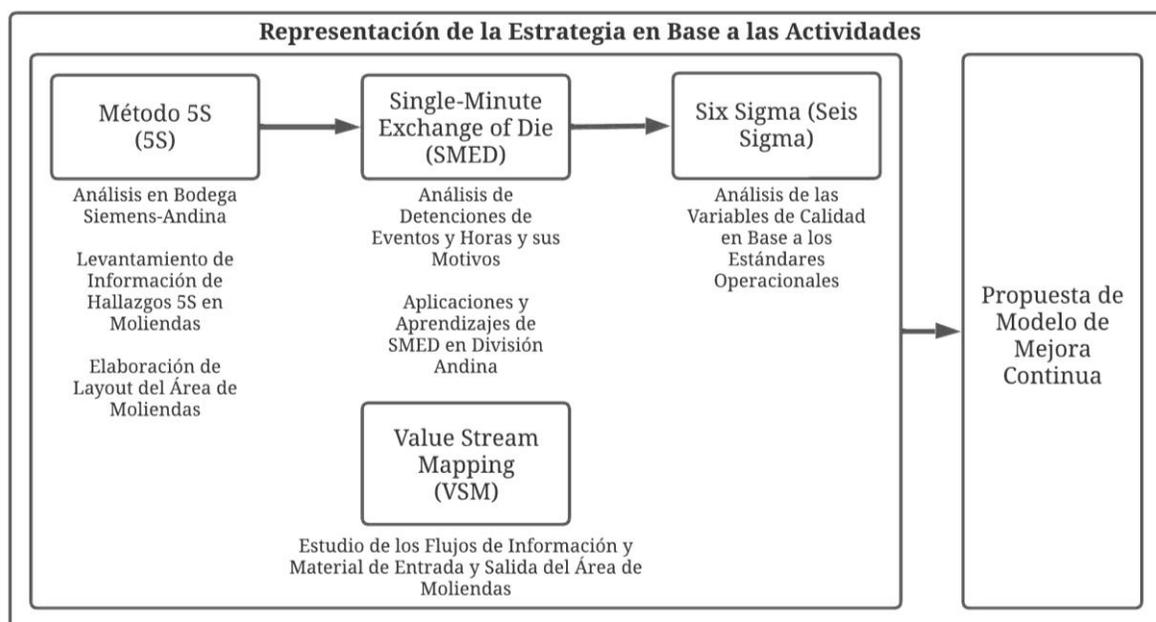
**Figura 1.11: Estrategia para la Generación del Modelo**



Fuente: Elaboración propia

La misma representación de la estrategia se muestra basada en las actividades para lograr el aprendizaje necesario para los siguientes capítulos y secciones del informe. La **Figura 1.12** muestra dicha representación con las actividades para lograr los objetivos planteados.

**Figura 1.12: Actividades para Lograr los Objetivos Propuestos**



Fuente: Elaboración propia

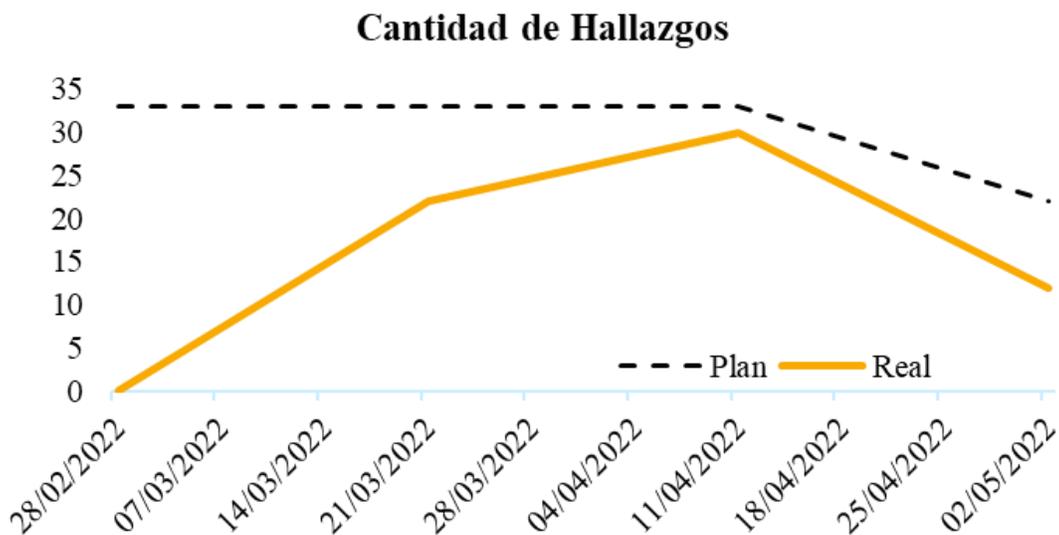
## 2. Capítulo II: Desarrollo

En este capítulo se abordan los resultados obtenidos reflejando la metodología presentada en conjunto con las herramientas de análisis propuestas. Además, se muestran las limitaciones del estudio, sus causas y su posterior impacto en el futuro.

### 2.1 Análisis de Método 5S

El análisis de las 5S contempló dos fases de carácter empírico como actividades iniciales en el aprendizaje y el levantamiento de información del área de molindas (MSAG y MUN2) para la formulación de un estándar completo. Dichas fases consistieron en la implementación del método 5S en una bodega de la planta concentradora (Plan Piloto Siemens), y el levantamiento de información y elaboración de un *layout* de las áreas de molindas de interés. Además, se tomaron como antecedentes, los resultados logrados por la División Chuquicamata en conjunto con Casa Matriz hasta mayo del presente año, logros que se han visto reflejado en un mejor orden y organización, recuperación de áreas, en la eliminación de desperdicios y mejora en la disciplina (ver **Figura 2.1**). Casa Matriz en conjunto con División Chuquicamata han logrado grandes avances en esta materia debido a la participación e involucramiento de los trabajadores en todos los niveles jerárquicos de la Corporación.

Figura 2.1: Hallazgos 5S en División Chuquicamata



Fuente: Codelco – Casa Matriz

### 2.1.1 Implementación en Bodega Siemens

El plan piloto inició en colaboración con una ingeniera de Excelencia Operacional de División Andina y el encargado de abastecimiento de la empresa alemana Siemens (una de las empresas contratistas de la División). El método se aplicó específicamente en una bodega de insumos y materiales de pernería y niplería, tecles y máquinas eléctricas. Esta bodega es utilizada tanto por Siemens como por la División.

Cabe mencionar que la empresa Siemens cuenta con un estándar propio que se aplica en la bodega llamado *Procedimiento de administración de bodega y pañol*. A pesar de la existencia de este procedimiento interno de Siemens, el método 5S no representó una interferencia con las prácticas que se realizan diariamente por parte de los trabajadores.

La implementación se hizo con retroalimentaciones en reuniones y a través de una *Lista de Comprobación del Diagnóstico de las 5S en el Lugar de Trabajo* como se muestra en el Anexo B y en la **Tabla 2.1**, el cual es un sistema de evaluación (adaptado para este análisis) recomendado por la Sociedad Americana para la Calidad (American Society for Quality, 2022a).

Los resultados (ver **Figura 2.2**) indican que la evaluación de la gestión que realiza Siemens en la bodega de la planta concentradora es muy buena (92 puntos de un total de 120) a pesar de que existe una deficiencia en la última etapa (disciplina). La buena gestión de Siemens se debe a la existencia de:

- Estándar interno de empresa Siemens.
- Procedimiento que indica cómo recibir y entregar herramientas limpias y libres de suciedad, lo que se puede o no almacenar en los estantes (como por ejemplo materiales peligrosos).
- Inspecciones anuales.
- Renovación de pinturas cada tres meses aproximadamente.
- Registro de sanitizado y solicitudes de materiales de limpieza de manera mensual por parte de Siemens.

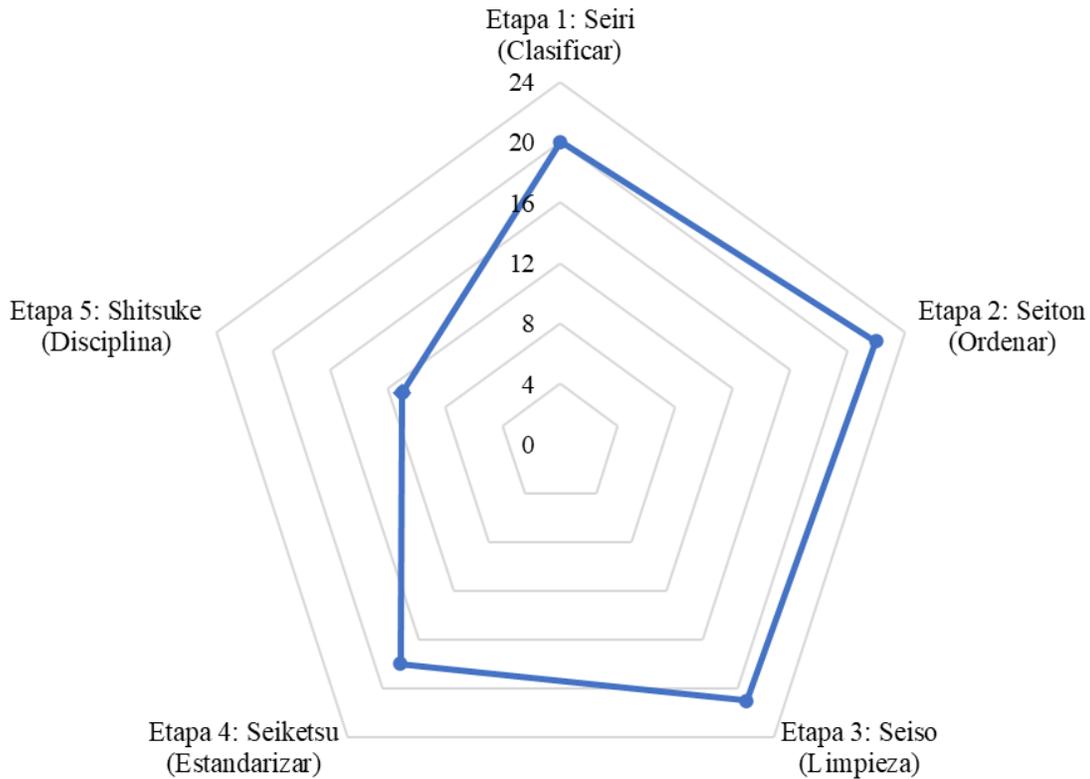
Dentro de los esfuerzos a futuro por parte de Siemens, está el rotular los pesos visibles a través de un sistema de rango de peso y unidades permitidas, y delimitaciones de los pasillos de tipo ABC para lograr rapidez en la búsqueda de artículos y reducir los tiempos a menos de 30 segundos.

**Tabla 2.1: Resultados de la Evaluación**

| <b>Paso</b>             | <b>Número de Problemas Encontrados</b> | <b>Causas de los Problemas</b>   | <b>Acción / Requerimiento</b>  |
|-------------------------|--|--|--|
| Clasificar (Seiri)      | 4                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inexistencia o desconocimiento de un responsable encargado de inventario por parte de División Andina lo que ocasiona problemas de orden y responsabilidad. Esto además trae como consecuencia que División Andina no tenga en conocimiento el inventario que posee.</li> <li>2. Existencia de artículos innecesarios en dos pasillos y en tres esquinas de la bodega.</li> <li>3. La inspección anual de Siemens registró la existencia de productos químicos y material peligroso.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Levantamiento de información de la necesidad de un responsable de la División Andina en bodega.</li> <li>2. Levantamiento de información de la necesidad de una jaula exterior para el almacenamiento de material peligroso con el área de planificación.</li> </ol>   |
| Ordenar (Seiton)        | 2                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mucho inventario por parte División Andina lo que impide ordenar. Además, Siemens no puede hacerse cargo de ello por no tener los permisos correspondientes ni la responsabilidad de ello.</li> <li>2. No están muy bien delimitados los estantes ni la pintura de piso.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se solicitaron las pinturas de delimitación del suelo (color amarillo).</li> </ol>   |
| Limpieza (Seiso)        | 3                                      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se genera un problema en el pañol por estar ubicado en las cercanías de una chimenea de extracción de la planta concentradora.</li> <li>2. Letreros, carteles y etiquetas no se encuentran limpios por estar en proceso de renovación.</li> <li>3. Debido a la falta de uso de pernería y niplería que es propiedad de Codelco, esta se encuentra con acumulación de polvo.</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se solicitó registrar el problema de polución asociado a las chimeneas de extracción y dar conocimiento de este a la Gerencia de Salud y Seguridad Ocupacional (GSSO) para realizar mediciones de calidad ambiental.</li> </ol>  |
| Estandarizar (Seiketsu) | 22                                     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mantener y controlar los primeros tres pasos no se ha logrado de manera eficiente por ser la primera vez que se ejecuta.</li> <li>2. Repisas de los estantes no cuentan con la indicación de peso, volumen y artículo.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se detectó una anomalía en la responsabilidad asociada a los extintores en bodega que además se encuentran mal ubicados y representan un riesgo de seguridad. Además, se escaló esta información a GSSO.</li> </ol>  |
| Disciplina (Shitsuke)   | 13                                     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Existen 4 pañoleros que desconocen y no han recibido la formación de la implementación 5S.</li> <li>2. Debido a las condiciones climáticas de la zona (nevadas), se ha implementado la Operación Invierno que implica el encierro de trabajadores en campamento minero u hogar. Esto ocasiona que no se puedan efectuar las 5S diarias y las inspecciones.</li> <li>3. Existen complicaciones en cuanto a lograr el compromiso por parte de la División Andina para hacerse cargo del inventario presente en bodega que causa desorden. Esto radica en un problema de responsabilidades y falta de delegación de estas.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Instruir a los pañoleros que desconocen el método 5S.</li> <li>2. Como las condiciones climáticas son un factor externo no controlable, se debe esperar para seguir los pasos cuando el clima mejore.</li> <li>3. Insistir en la necesidad de responsables o delegados de División Andina en la bodega. Se deben compartir responsabilidades una vez logrado lo anterior.</li> </ol> |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 2.2: Gráfico Radial de Resultados de la Implementación 5S  
Puntaje de la Implementación 5S (Bodega Siemens)**



Fuente: Elaboración propia

### 2.2.2. Levantamiento de Información y Elaboración de Layout de Planta

Paralelamente al trabajo en bodega Siemens, se levantó información (a través de una caminata gamba) sobre el estado actual de la planta concentradora, específicamente donde se ubican MSAG y MUN2. Esta información se levantó a través de registros fotográficos y se clasificó en base los criterios trabajados por División Chuquicamata. Los resultados más relevantes de carácter general fueron que se encontraron un total de 47 hallazgos en MUN2 y 63 en MSAG lo que representa un 42,7% y 57,3% respectivamente. Realizando un desglose más detallado, las Áreas y/o Equipos con mayor cantidad de hallazgos en MSAG, fueron túnel SAG a túnel sur, correas A10/A11, chancadores pebbles y molino bolas 2 (ver **Tabla 2.2**). En cuanto a MUN2 las Áreas/Equipos con mayor cantidad de hallazgos fueron molino unitario 2, pasillo, correa M9 y bodegas (ver **Tabla 2.3**).

**Tabla 2.2: Número de Hallazgos 5S por Equipo (MSAG)**

| <b>Área: MSAG</b>                            |                       | <b>Nombres: Rodolfo Brito H. / Isidora Barros R. / Luis Urbina P.</b> |                           |                       |                             | <b>Cargos: Ingeniero Graduado / Ingeniera Graduada / Ingeniero Especialista B</b> |                         |                 |                           |                   | <b>Día de la Inspección:</b><br>09/06/2022 |
|--|-----------------------|---|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|---|-------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|--|
| <b>Agente de Cambio:</b><br>Patricio Soto J. |                       |   |                           |                       |                             |   |                         |                 |                           |                   |  |
| <b>Nº</b>                                    | <b>Área / Equipo</b>  | <b>Desechos</b>   | <b>Condición Insegura</b> | <b>Difícil Acceso</b> | <b>Elemento Innecesario</b> | <b>Fuente de Suciedad</b>   | <b>Foco de Suciedad</b> | <b>Desorden</b> | <b>Total de Hallazgos</b> | <b>Porcentaje</b> | <b>Comentario / Registro</b>               |
| 1  | Molino Bolas 1        | -   | -                         | -                     | 2                           | -   | -                       | -               | 2                         | 3.2%              | SC / CRF                                   |
| 2  | Molino Bolas 2        | 2   | 1                         | -                     | 1                           | -   | -                       | 2               | 6                         | 9.5%              | SC / CRF                                   |
| 3  | Túnel MSAG            | 1   | -                         | -                     | -                           | -   | -                       | 4               | 5                         | 7.9%              | SC / CRF                                   |
| 4  | Chancadores Pebbles   | -   | 1                         | 1                     | 5                           | 1   | -                       | -               | 8                         | 12.7%             | SC / CRF                                   |
| 5  | Correas A10/A11       | 1   | -                         | 1                     | 4                           | 1   | -                       | 3               | 10                        | 15.9%             | SC / CRF                                   |
| 6  | Harneros              | -   | 1                         | 1                     | -                           | -   | 1                       | 1               | 4                         | 6.3%              | SC / CRF                                   |
| 7  | Ciclones              | -   | -                         | -                     | 1                           | -   | 1                       | 1               | 3                         | 4.8%              | SC / CRF                                   |
| 8  | Molino SAG            | -   | -                         | 1                     | -                           | -   | -                       | 3               | 4                         | 6.3%              | SC / CRF                                   |
| 9  | Túnel SAG a Túnel Sur | 4   | -                         | -                     | 1                           | -   | 1                       | 14              | 20                        | 31.7%             | SC / CRF                                   |
| 10   | Acceso SAG            | -   | -                         | -                     | -                           | -   | -                       | 1               | 1                         | 1.6%              | SC / CRF                                   |
| <b>Total de Hallazgos</b>                    |                       | <b>8</b>  | <b>3</b>                  | <b>4</b>              | <b>14</b>                   | <b>2</b>  | <b>3</b>                | <b>29</b>       | <b>63</b>                 |                   |  |
| <b>Porcentaje</b>                            |                       | 12.7%   | 4.8%                      | 6.3%                  | 22.2%                       | 3.2%  | 4.8%                    | 46.0%           |                           |                   |  |

Fuente: Elaboración propia (SC / CRF: Sin Comentarios / Con Registro Fotográfico)

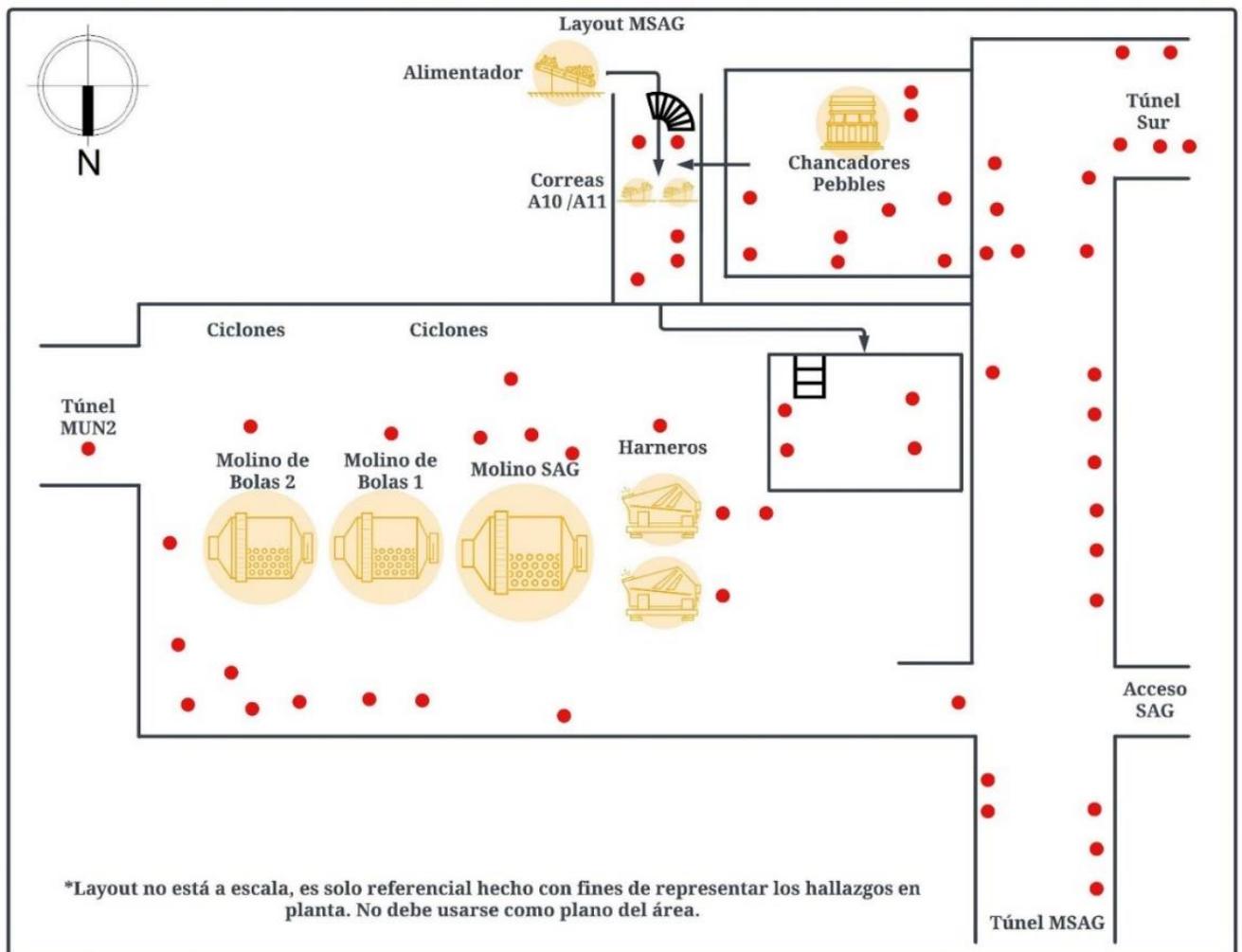
**Tabla 2.3: Número de Hallazgos 5S por Equipo (MUN2)**

| <b>Área: MUN2</b>                            |                          | <b>Nombres: Rodolfo Brito H. / Isidora Barros R. / Luis Urbina P.</b> |                           |                       |                             | <b>Cargos: Ingeniero Graduado / Ingeniera Graduada / Ingeniero Especialista B</b> |                         |                 |                           |                   | <b>Día de la Inspección:</b><br>09/06/2022 |
|--|--------------------------|---|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|---|-------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|--|
| <b>Agente de Cambio:</b><br>Patricio Soto J. |                          |   |                           |                       |                             |   |                         |                 |                           |                   |  |
| <b>Nº</b>                                    | <b>Área / Equipo</b>     | <b>Desechos</b>   | <b>Condición Insegura</b> | <b>Difícil Acceso</b> | <b>Elemento Innecesario</b> | <b>Fuente de Suciedad</b>   | <b>Foco de Suciedad</b> | <b>Desorden</b> | <b>Total de Hallazgos</b> | <b>Porcentaje</b> | <b>Comentario / Registro</b>               |
| 1  | Túnel MSAG a MUN2        | -   | -                         | -                     | 1                           | -   | -                       | -               | 1                         | 2.1%              | SC / CRF                                   |
| 2  | Molino Unitario 2        | -   | 2                         | 1                     | 3                           | 1   | -                       | 4               | 11                        | 23.4%             | SC / CRF                                   |
| 3  | Correa M9                | -   | -                         | -                     | -                           | -   | 5                       | -               | 5                         | 10.6%             | SC / CRF                                   |
| 4  | Alimentador MUN2         | -   | 2                         | -                     | -                           | -   | -                       | 2               | 4                         | 8.5%              | SC / CRF                                   |
| 5  | Bombas Ciclones          | -   | -                         | -                     | -                           | -   | -                       | 1               | 1                         | 2.1%              | SC / CRF                                   |
| 6  | Ciclones                 | -   | -                         | 1                     | -                           | 2   | -                       | 1               | 4                         | 8.5%              | SC / CRF                                   |
| 7  | Cuba de Descarga         | 1   | -                         | -                     | -                           | -   | -                       | 3               | 4                         | 8.5%              | SC / CRF                                   |
| 8  | Túnel MUN2               | -   | 1                         | -                     | 2                           | -   | -                       | -               | 3                         | 6.4%              | SC / CRF                                   |
| 9  | Escalera a Alimentadores | -   | -                         | -                     | -                           | -   | 2                       | -               | 2                         | 4.3%              | SC / CRF                                   |
| 10   | Alimentador MUN2         | -   | -                         | -                     | -                           | -   | -                       | -               | 0                         | 0.0%              | SC / CRF                                   |
| 11   | Liner                    | -   | -                         | -                     | 1                           | -   | -                       | -               | 1                         | 2.1%              | SC / CRF                                   |
| 12   | Bodegas                  | 1   | -                         | -                     | 1                           | -   | -                       | 3               | 5                         | 10.6%             | SC / CRF                                   |
| 13   | Pasillo                  | 1   | -                         | 1                     | 1                           | -   | 1                       | 2               | 6                         | 12.8%             | SC / CRF                                   |
| <b>Total de Hallazgos</b>                    |                          | <b>3</b>  | <b>5</b>                  | <b>3</b>              | <b>9</b>                    | <b>3</b>  | <b>8</b>                | <b>16</b>       | <b>47</b>                 |                   |  |
| <b>Porcentaje</b>                            |                          | 6.4%  | 10.6%                     | 6.4%                  | 19.1%                       | 6.4%  | 17.0%                   | 34.0%           |                           |                   |  |

Fuente: Elaboración propia (SC / CRF: Sin Comentarios / Con Registro Fotográfico)

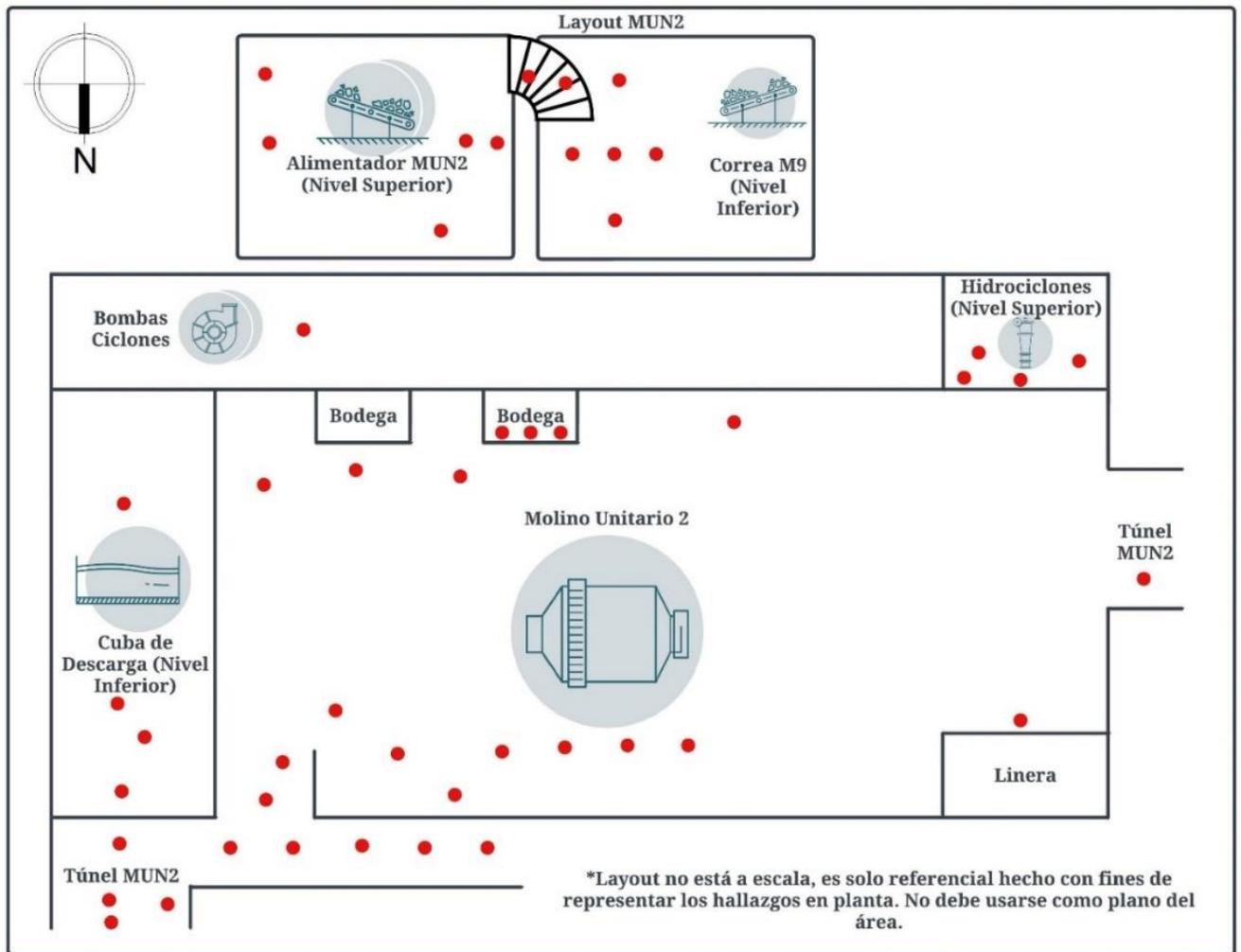
En cuanto al levantamiento de esta información visto de una manera visual, uno de los aspectos actuales más importantes de la planta concentradora, es que no existe un plano o *layout* que ayude en labores de planificación, operaciones, mantenimiento y/o ejecución. Por esta razón se realizó un *layout* básico con los puntos relevantes (Áreas/Equipos) con los puntos críticos de los hallazgos que se encontraron en la caminata gamba (ver **Figura 2.3** y **Figura 2.4**).

**Figura 2.3: Layout MSAG con Hallazgos 5S**



Fuente: Elaboración propia

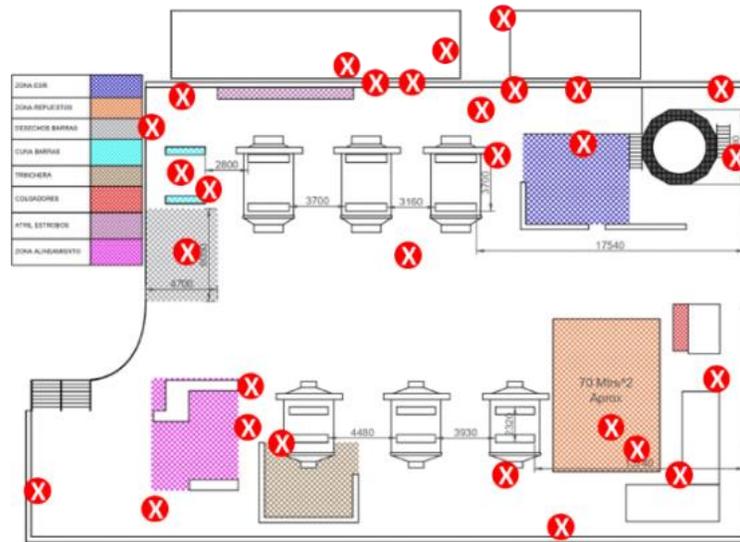
Figura 2.4: Layout MUN2 con Hallazgos 5S



Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que resulta mucho más fácil posicionar los hallazgos en un *layout* o en un formato más visual, en comparación a tablas, para organizar y planificar trabajos a futuro en cuanto a la implementación 5S, tanto para quien realiza el levantamiento de información como para quien lo revisa o consulta. División Chuquicamata cuenta con planos y *layouts* para su uso en esta práctica como muestra la **Figura 2.5**.

**Figura 2.5: Hallazgos en Área de Molienda**



Fuente: Codelco – División Chuquicamata

Debido al potencial que tiene el método 5S y de la aplicación del material para las evaluaciones con base en lo propuesto principalmente por la American Society for Quality y la División Chuquicamata, se proponen los Anexos B, C, D y E para la estandarización del modelo de mejora continua.

## 2.2 Tonelaje de Entrada a Moliendas

En el 2021, a las tolvas de las moliendas SAG y unitaria 2 ingresaron en conjunto 15.809.503,8 tms (toneladas métricas secas), lo que representa un 61,5% del tonelaje anual versus el 38,5% que representaron las moliendas convencional y unitaria 1 con un total de 9.883.470,3 tms. En la **Tabla 2.4** se muestran valores estadísticos de las cuatro moliendas donde uno de los aspectos que más llaman la atención es que la molienda SAG representa el mayor promedio diario y a su vez la mayor variabilidad en el tonelaje. Esto se debe a que en 49 días se registraron 0 tms de tonelaje el cual es el valor mínimo registrado en el periodo, y 50 en el caso de MUN2 (ver **Tabla 2.5**). Las principales causas de este comportamiento, radica en una huelga que afectó a las plantas de la División Andina, en el Plan de Invierno (plan que considera los efectos climáticos, confinamiento por nevadas, restricciones de seguridad, etcétera) y en las detenciones programadas (mantenimiento) y no programadas (fallas).

**Tabla 2.4: Estadísticas Descriptivas del Tonelaje por Molienda**

| Molienda                           | Total Anual (tms) | Total Anual (%) | Media (tms) | Mediana (tms) | Desviación Estándar (tms) | Mínimo (tms) | Máximo (tms) |
|------------------------------------|-------------------|-----------------|-------------|---------------|---------------------------|--------------|--------------|
| MSAG                               | 9.764.590,0       | 38,0%           | 26.752,3    | 32.300,0      | 13.409,6                  | 0            | 42.720,0     |
| MUN2                               | 6.044.913,8       | 23,5%           | 16.561,4    | 20.302,2      | 9.149,6                   | 0            | 28.236,7     |
| MCONV                              | 8.467.058,6       | 33,0%           | 23.197,4    | 26.807,2      | 9.535,2                   | 0            | 33.582,7     |
| MUN1                               | 1.416.411,7       | 5,5%            | 3.880,6     | 4.881,7       | 1.942,0                   | 0            | 5.711,2      |
| Total (MSAG / MUN2)                | 15.809.503,8      | 61,5%           | 43.313,7    | 51.714,7      | 21.531,6                  | -            | -            |
| Total (MSAG / MUN2 / MCONV / MUN1) | 25.692.974,1      | 100%            | 7.0391,7    | 81.559,1      | 29.193,0                  | -            | -            |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.5: Días con Tonelaje Mínimo (0 tms) por Molienda**

| Molienda | Días con Tonelaje Mínimo (0 tms) |
|----------|----------------------------------|
| MSAG     | 49                               |
| MUN2     | 50                               |
| MCONV    | 34                               |
| MUN1     | 49                               |

Fuente: Elaboración propia

Para resultados más precisos, el análisis se realizó en base a los días con tonelaje mayor a cero tms. Esto dejó una base de cálculo de 316 días para MSAG y 315 días para MUN2 lo que arroja nuevas estadísticas descriptivas como se ve en la **Tabla 2.6**, aumentando el valor para la media y mediana, y reduciendo la variabilidad (desviación estándar). También se observan valores distintos de cero para los valores mínimos.

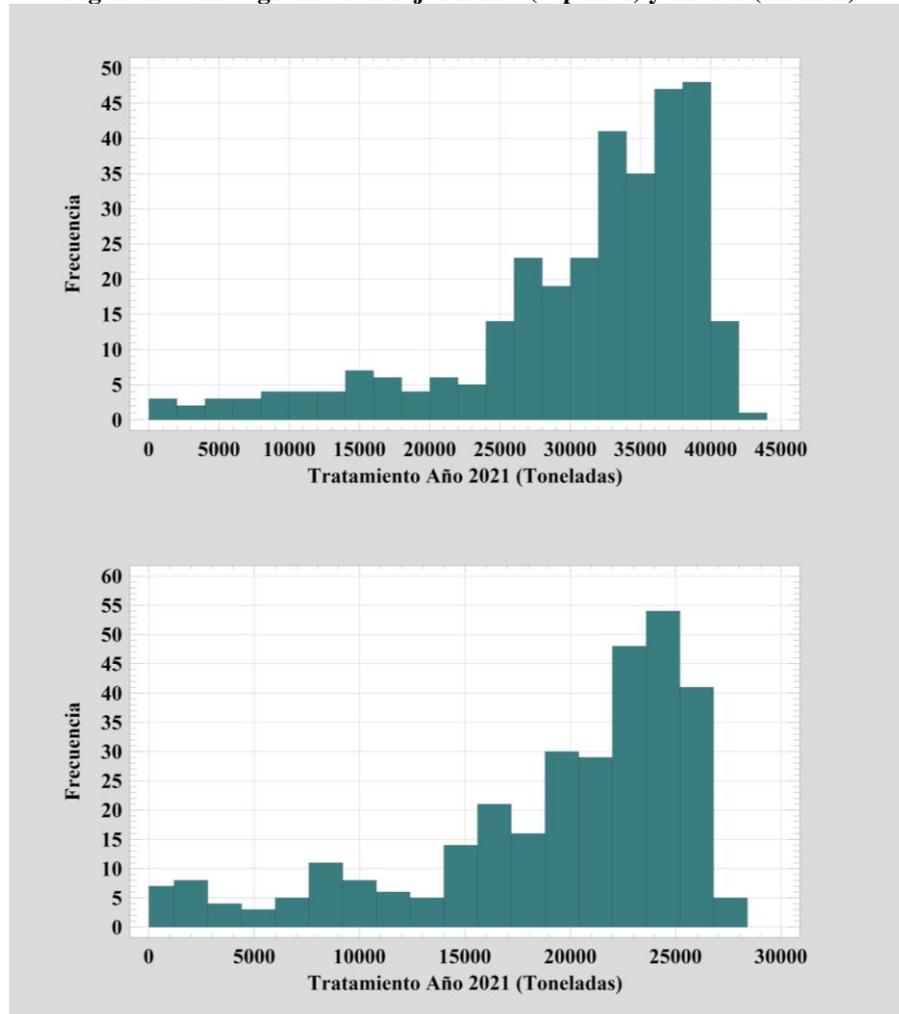
**Tabla 2.6: Estadísticas Descriptivas del Tonelaje por Molienda (sin Considerar Días con 0 tms de Producción)**

| Molienda | Media (tms) | Mediana (tms) | Desviación Estándar (tms) | Mínimo (tms) | Máximo (tms) |
|----------|-------------|---------------|---------------------------|--------------|--------------|
| MSAG     | 30.900,6    | 33.530,0      | 8.899,3                   | 150,0        | 42.720,0     |
| MUN2     | 19.190,2    | 21.445,6      | 6.814,5                   | 9,8          | 28.236,7     |

Fuente: Elaboración propia

De los histogramas (ver **Figura 2.6**) se visualiza una distribución de los datos que se asemejan a una distribución del valor extremo más pequeño, lo que tiene sentido desde el punto de vista productivo, ya que, se pretende que estos valores estén más cercanos a los límites teóricos de las máquinas y por ende existe una mayor densidad entorno a estos valores (48,3 ktpd para MSAG y 25,8 ktpd para MUN2).

Figura 2.6: Histograma Tonelaje MSAG (superior) y MUN2 (inferior)



Fuente: Elaboración propia

### 2.3 Análisis de Detenciones por Equipos de Moliendas para SMED

Para establecer un modelo que contemple variables de manera eficiente con el método SMED, se analizaron los datos de las horas y eventos de detención de los equipos de MSAG y MUN2. Cuando un equipo sufre una detención, se envían automáticamente los datos desde este a través de sensores, se ingresan los motivos de la detención por parte del área de operaciones para luego ser verificados y validados por los ingenieros de confiabilidad. El software que es utilizado para registrar el flujo de información se llama PI System. Los motivos de detención involucran tres niveles de especificación: nivel 1, nivel 2 y nivel 3. Tal como muestra la **Figura 2.7**, los motivos de nivel 1 son de cuatro tipos: **mantenimiento no programada**, **mantenimiento programada**, **operacional** y **reserva**. Estos cuatro motivos son explicados a continuación:

- **Mantenimiento no programada:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra detenido por motivos de fallas o factores que alteran el correcto funcionamiento y que implican una reparación o mantenimiento no programada.
- **Mantenimiento programada:** es el espacio de tiempo en que el equipo se encuentra detenido por labores de reparación o mantenimiento según el Plan Matriz elaborado cada año (este plan se encuentra disponible en la plataforma SAP que es un ERP que utiliza Codelco).
- **Operacional:** corresponde al espacio de tiempo en que el equipo se encuentra apto para las labores y con operador disponible para cumplir con las actividades asociadas a la operación.
- **Reserva:** es el espacio de tiempo en que un equipo se encuentra apto para cumplir su función de diseño, pero sin un operador que lo utilice.

**Figura 2.7: Motivos de Detenciones por Niveles**



Fuente: Elaboración propia

Para el año 2021, en total se tuvieron 126.607,7 horas de detenciones para las distintas máquinas de MSAG. En cambio, para MUN2, el total fue de 48.442,1 horas. Es importante mencionar que estos valores totales contemplan todas las máquinas de cada área de las molindas estudiadas y el detalle

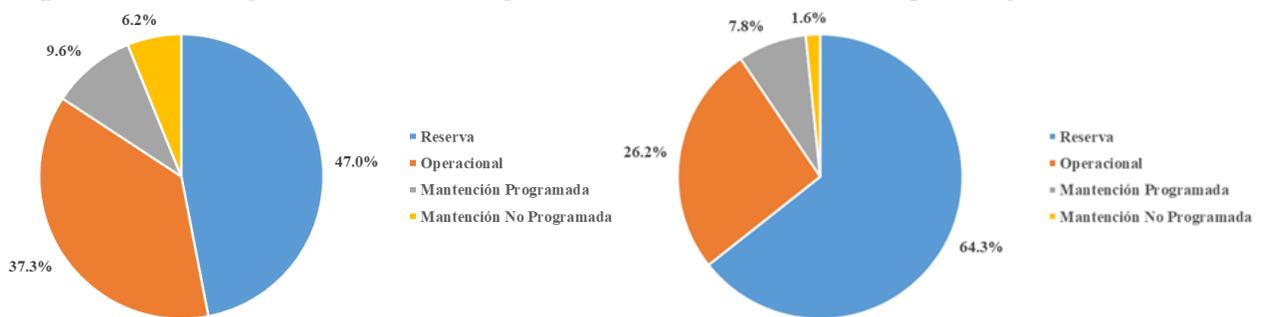
por tipo de detención se presentan en la **Tabla 2.7**. Además, se muestran los resultados de manera porcentual en la **Figura 2.8**, donde para ambas molineras se presentan los mismos patrones de orden en cuanto los porcentajes de los cuatro tipos de detenciones existentes: reserva, operacional, mantenimiento programada y mantenimiento no programada (en orden decreciente). El detalle del tipo de detención no programada en base a horas se detalla en la **Figura 2.9**.

**Tabla 2.7: Horas por Tipo de Detención (Año 2021)**

| Detención                   | MSAG (horas) | MUN2 (horas) |
|-----------------------------|--------------|--------------|
| Mantenimiento Programada    | 12.161,8     | 3.783,1      |
| Mantenimiento No Programada | 7.795,3      | 788,3        |
| Operacional                 | 47.203,4     | 12.701,0     |
| Reserva                     | 59.447,2     | 31.169,7     |
| Total                       | 126.607,7    | 48.442,1     |

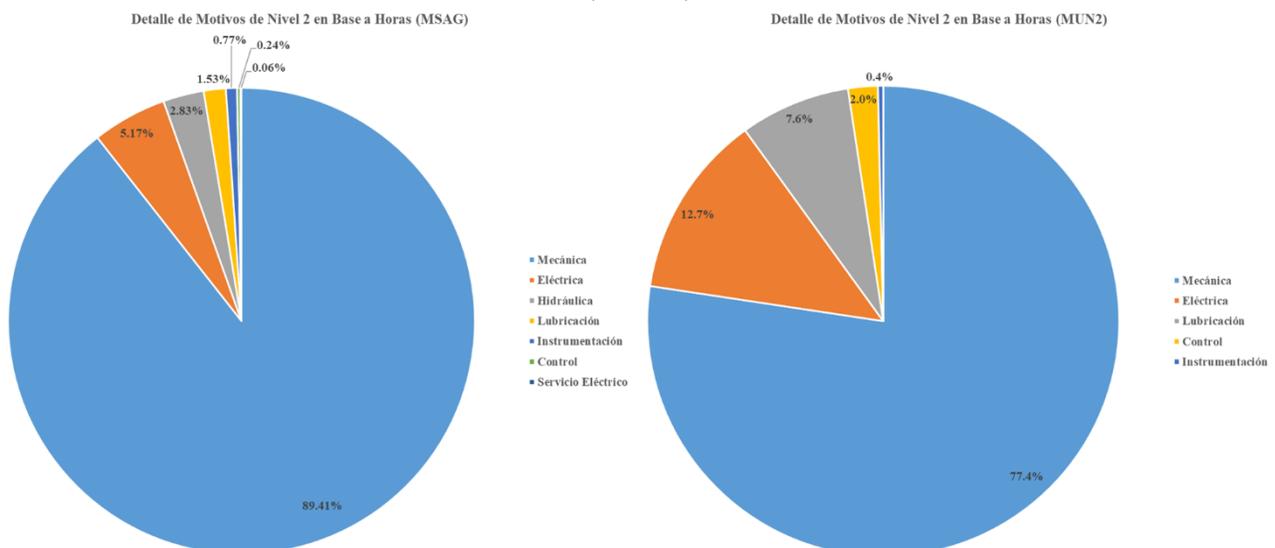
Fuente: Elaboración propia

**Figura 2.8: Porcentajes de Detenciones Respecto a Horas Totales de MSAG (izquierda) y MUN2 (derecha)**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2.9: Detalle en Detenciones No Programadas en Base a Horas Totales para MSAG (izquierda) y MUN2 (derecha)**



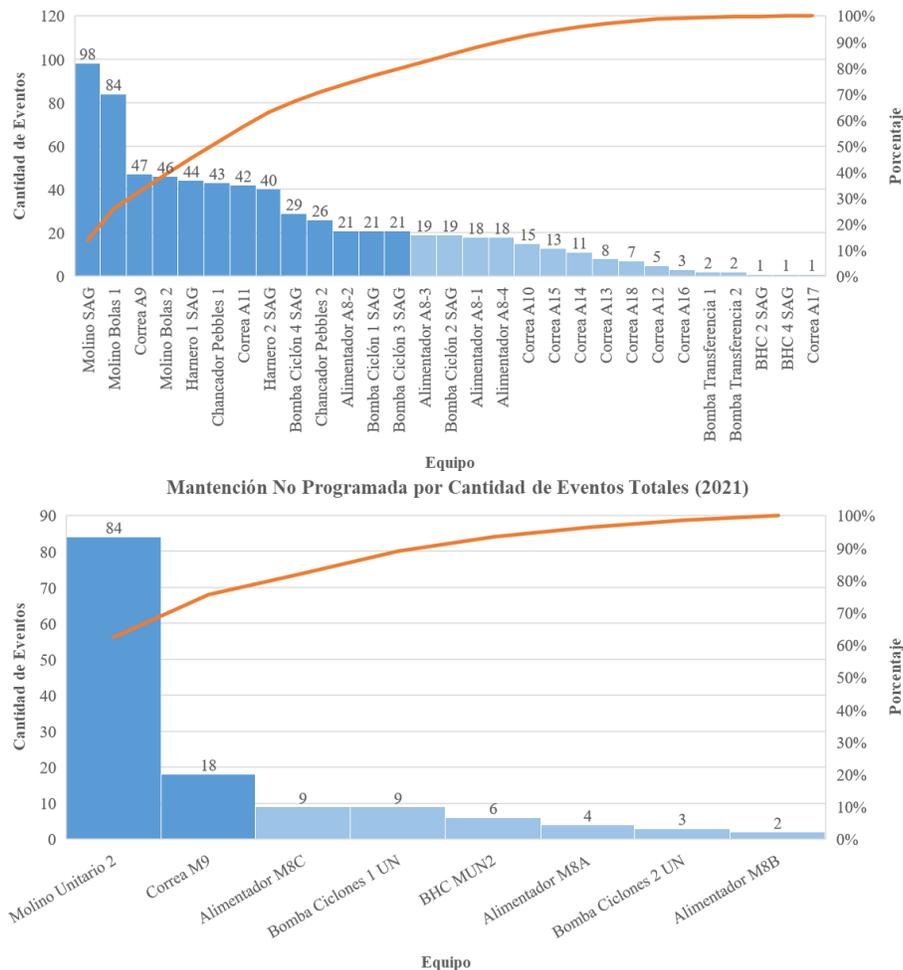
Fuente: Elaboración Propia

El análisis además consideró dos tipos de perspectivas: por cantidad de eventos y equipos para mantenencias no programadas y por horas y equipos para cada tipo de detención. Ambos estudios se realizaron a través de gráficos Pareto tanto para MSAG como para MUN2.

### 2.3.1 Análisis Pareto de Eventos por Equipo

En esta sección, se muestran los resultados del análisis de los eventos por equipo a través de gráficos de Pareto. En estos gráficos (ver **Figura 2.10**) se muestran los equipos que acumulan el 80% del total de número de eventos (o detenciones imprevistas) los que corresponden a un total de 705 y 135 eventos para MSAG y MUN2 respectivamente. Este análisis se realizó exclusivamente para el mantenimiento no programado puesto que estas detenciones son imprevistas e impactan en las operaciones diarias y se sustenta en la capacidad resolutoria y experiencia de los operadores.

**Figura 2.10: Gráfico de Pareto por Equipo y Evento para MSAG (superior) y MUN2 (inferior)**  
Mantenimiento No Programado por Cantidad de Eventos Totales (2021)



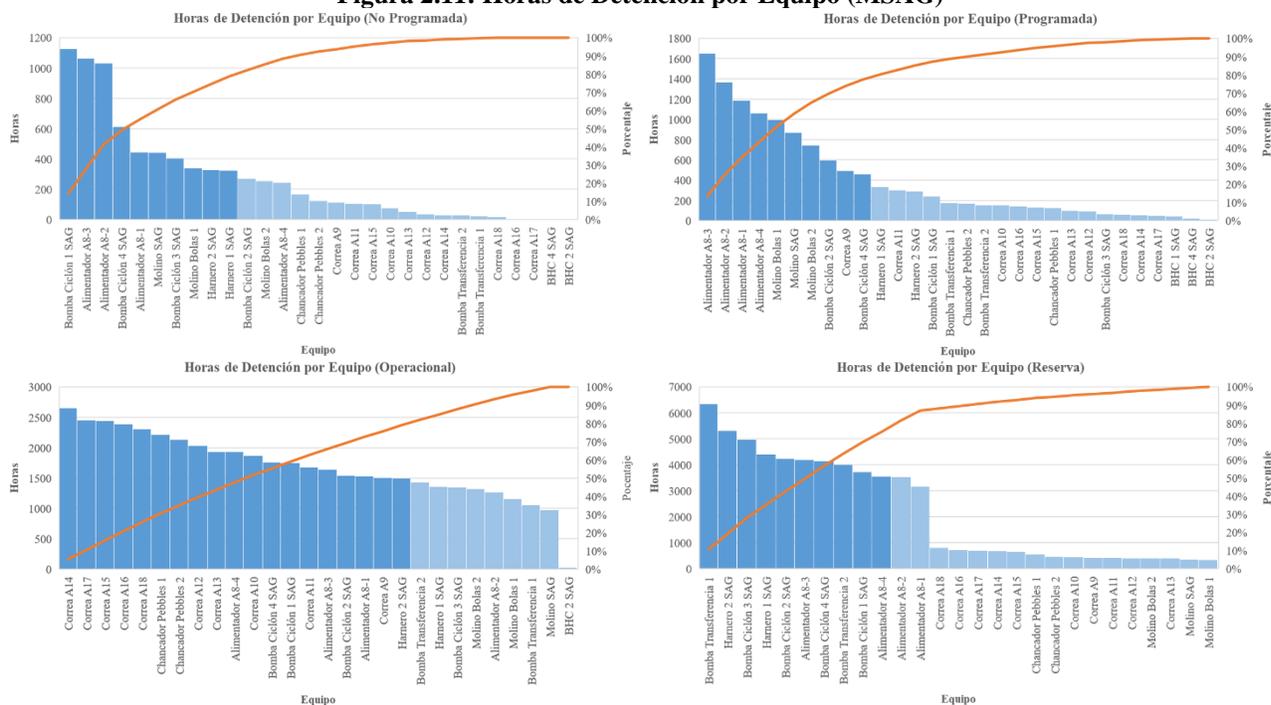
Fuente: Elaboración propia

Las barras en azul oscuro indican los equipos que califican dentro del 80% acumulado de los eventos totales versus las barras en azul claro que indican el 20% restante. Este tipo de gráfico es útil para la priorización de equipos en mantenimiento y para analizar problemas de equipos que se generan de manera recurrente. De los gráficos mostrados anteriormente, existen 13 equipos de un total de 29, para MSAG, que cumplen con el criterio mencionado y 2 equipos para MUN2 de un total de 8. Esto en porcentaje representa 44,8% (MSAG) y un 25% (MUN2) de equipos que debiesen entrar en una priorización para la realización de un estándar de reducción de tiempos.

### 2.3.2 Análisis Pareto de Horas por Equipo (MSAG)

Análogamente, esta vez se consideraron los equipos y cantidad de horas totales por detención. Del mismo modo, las barras en azul oscuro (ver **Figura 2.11**) indican aquellos equipos que acumulan el 80% del total de horas, que corresponden a un total de 7.795,3 horas de detención no programadas (ver **Tabla 2.7**). Es importante mencionar que el análisis de mayor importancia es el que estudia las detenciones no programadas debido a su naturaleza y debido a que los otros motivos responden a características que no son parte de los objetivos de este informe como, por ejemplo, las programadas se ejecutan en base a un Plan Matriz el cual es evaluado por el área de mantenimiento, confiabilidad y operaciones.

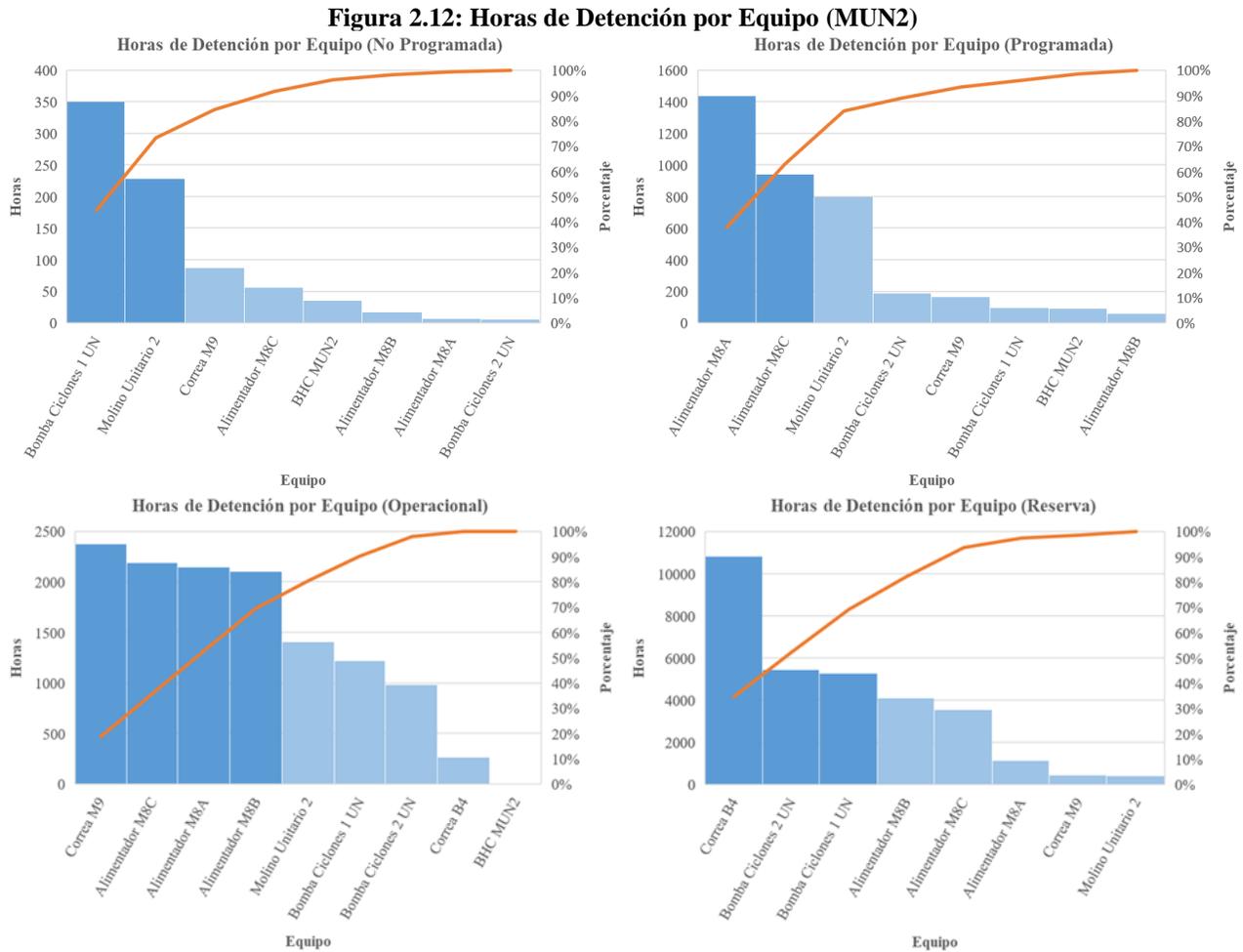
**Figura 2.11: Horas de Detención por Equipo (MSAG)**



Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3 Análisis Pareto de Horas por Equipo (MUN2)

Para la molienda unitaria 2, los equipos con mayor cantidad de horas no programadas corresponden a la bomba ciclones 1 UN y el molino unitario 2 con 350,1 y 228,4 horas respectivamente de un total de 788,3 horas. En la **Figura 2.12** se muestran estos resultados a través de los gráficos de Pareto respectivos.



Fuente: Elaboración propia

A modo de resumir la información, se presentan la **Tabla 2.8** y la **Tabla 2.9** que muestran el cruce de resultados de los análisis de priorización con los gráficos de Pareto. Este cruce de información muestra a todos los equipos que entran dentro del 80% acumulado tanto para horas como para eventos (marcados con una X). Notar que existen equipos que entran en ambas categorías de análisis como, por ejemplo, el alimentador A8-2 y molino unitario 2.

**Tabla 2.8: Resumen del Análisis Pareto de Equipos por Horas y Eventos (MSAG)**

| <b>Equipo</b>             |          | <b>Horas</b>  |          | <b>Eventos</b> |
|---------------------------|----------|---------------|----------|----------------|
| Alimentador A8-1          | X        | 447.0         | -        | -              |
| <b>Alimentador A8-2</b>   | <b>X</b> | <b>1031.2</b> | <b>X</b> | <b>21</b>      |
| Alimentador A8-3          | X        | 1065.2        | -        | -              |
| Alimentador A8-4          | -        | -             | -        | -              |
| <b>Bomba Ciclón 1 SAG</b> | <b>X</b> | <b>1125.0</b> | <b>X</b> | <b>21</b>      |
| Bomba Ciclón 2 SAG        | -        | -             | -        | -              |
| <b>Bomba Ciclón 3 SAG</b> | <b>X</b> | <b>405.6</b>  | <b>X</b> | <b>21</b>      |
| <b>Bomba Ciclón 4 SAG</b> | <b>X</b> | <b>614.7</b>  | <b>X</b> | <b>29</b>      |
| Bomba Transferencia 1     | -        | -             | -        | -              |
| Bomba Transferencia 2     | -        | -             | -        | -              |
| Chancador Pebbles 1       | -        | -             | X        | 43             |
| Chancador Pebbles 2       | -        | -             | X        | 26             |
| Correa A10                | -        | -             | -        | -              |
| Correa A11                | -        | -             | X        | 42             |
| Correa A12                | -        | -             | -        | -              |
| Correa A13                | -        | -             | -        | -              |
| Correa A14                | -        | -             | -        | -              |
| Correa A15                | -        | -             | -        | -              |
| Correa A16                | -        | -             | -        | -              |
| Correa A17                | -        | -             | -        | -              |
| Correa A18                | -        | -             | -        | -              |
| Correa A9                 | -        | -             | X        | 47             |
| <b>Harnero 1 SAG</b>      | <b>X</b> | <b>324.3</b>  | <b>X</b> | <b>44</b>      |
| <b>Harnero 2 SAG</b>      | <b>X</b> | <b>328.6</b>  | <b>X</b> | <b>40</b>      |
| <b>Molino Bolas 1</b>     | <b>X</b> | <b>340.8</b>  | <b>X</b> | <b>84</b>      |
| Molino Bolas 2            | -        | -             | X        | 46             |
| <b>Molino SAG</b>         | <b>X</b> | <b>443.1</b>  | <b>X</b> | <b>98</b>      |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.9: Resumen Análisis Pareto de Equipos por Horas y Eventos (MUN2)**

| <b>Equipo</b>            |          | <b>Horas</b> |          | <b>Eventos</b> |
|--------------------------|----------|--------------|----------|----------------|
| Alimentador M8A          | -        | -            | -        | -              |
| Alimentador M8B          | -        | -            | -        | -              |
| Alimentador M8C          | -        | -            | -        | -              |
| Bomba Ciclones 1 UN      | X        | 350,1        | -        | -              |
| Bomba Ciclones 2 UN      | -        | -            | -        | -              |
| Correa B4                | -        | -            | -        | -              |
| Correa M9                | -        | -            | X        | 18             |
| <b>Molino Unitario 2</b> | <b>X</b> | <b>228,4</b> | <b>X</b> | <b>84</b>      |

Fuente: Elaboración propia

El análisis de las causas de las fallas de los equipos que cumplen con el cruce de los análisis de los gráficos de Pareto se analizó de manera más exhaustiva llegando a las principales causas de falla de estas máquinas tal como se presentan en la **Tabla 2.10** y en la **Tabla 2.11**.

**Tabla 2.10: Principales Causas de Falla en MSAG**

| Equipo             | Motivo Nivel 2 | Horas Totales de Nivel 2 | Causa de Falla del Equipo       | Horas  | Porcentaje del Total de Horas de Nivel 2 (%) |
|--------------------|----------------|--------------------------|---------------------------------|--------|--|
| Alimentador A8-2   | Mecánica       | 1.029,8                  | Chute                           | 151,15 | 14,7%  |
|                    |                |                          | Cinta transportadora            | 878,69 | 85,3%  |
| Bomba Ciclón 1 SAG | Mecánica       | 1.123,9                  | Ducto de descarga de la bomba   | 113,34 | 10,1%  |
|                    |                |                          | Machon de acoplamiento          | 173,06 | 15,4%  |
|                    |                |                          | Rodamiento de motor de bomba    | 448,59 | 39,9%  |
| Bomba Ciclón 3 SAG | Mecánica       | 315,4                    | Rodamiento de motor de bomba    | 143,81 | 45,6%  |
| Bomba Ciclón 4 SAG | Mecánica       | 610,8                    | Componentes de sistema de bomba | 156,56 | 25,6%  |
|                    |                |                          | Empaquetadura de bomba          | 121,53 | 19,9%  |
|                    |                |                          | Prensa estopa de bomba          | 193,74 | 31,7%  |
| Harnero 1 SAG      | Mecánica       | 324,3                    | Módulo                          | 194,59 | 60,0%  |
| Harnero 2 SAG      | Mecánica       | 328,6                    | Módulo                          | 173,94 | 52,9%  |
| Molino Bolas 1     | Mecánica       | 281,6                    | Corazas de casco                | 97,71  | 34,7%  |
| Molino SAG         | Eléctrica      | 289,8                    | Sistema entrehierro             | 205,84 | 71,0%  |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.11: Principales Causas de Falla en MUN2**

| Equipo            | Motivo Nivel 2 | Horas Totales de Nivel 2 | Causa de Falla del Equipo              | Horas | Porcentaje del Total de Horas de Nivel 2 (%) |       |       |
|-------------------|----------------|--------------------------|--|-------|--|-------|-------|
| Molino Unitario 2 | Eléctrica      | 86,9                     | Partidor general del sistema eléctrico | 80,96 | 93,1%  |       |       |
|                   |                |                          | Circuito de lubricación                | 14,92 | 25,0%  |       |       |
|                   | Lubricación    | 59,6                     | Sistema de lubricación de alta presión | 32,92 | 55,2%  |       |       |
|                   |                |                          | Mecánica                               | 70,7  | Boquilla de alimentación                     | 31,69 | 44,8% |
|                   |                |                          |  |       | Otra falla mecánica (no detectada)           | 19,25 | 27,2% |

Fuente: Elaboración propia

Dentro de las principales fallas para los equipos de MSAG se encuentran las fallas de carácter mecánico a excepción del molino SAG que presenta mayoritariamente fallas eléctricas. Por otro

lado, en el caso de MUN2, el molino unitario 2 presenta fallas de lubricación, mecánicas y eléctricas, siendo esta última causa de falla la más relevante.

#### 2.3.4 Aplicaciones e Implementaciones de SMED en División Andina

Durante el desarrollo de este trabajo, se registraron documentos y resultados de aplicaciones de la aplicación de SMED. Dichas aplicaciones se realizaron en base a planes de mantenimiento programado en la mina subterránea (aguas arriba del proceso de moliendas) y en el área de operaciones de flotación (aguas abajo). En ambos casos, el objetivo clave es lograr la captura de valor en el corto plazo mediante la optimización en la ejecución de actividades operativas claves.

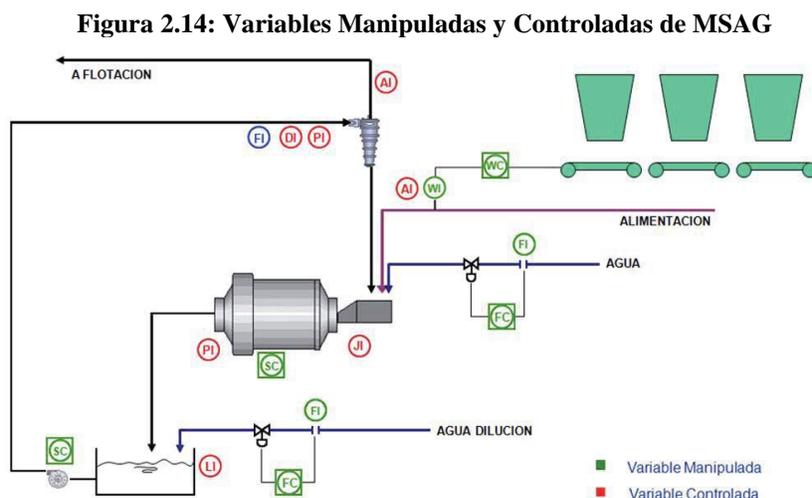
- **Martillo Hidráulico Pica Roca B81 (Mina Subterránea):** de febrero a marzo del presente año se realizaron las primeras preparaciones del taller SMED, taller que se efectuó a mediados de marzo y con la posterior ejecución y post mantenimiento en abril. Fue impulsado por el entonces Jefe de Unidad del área de Confiabilidad y tenía como foco el cambio de componentes de un martillo hidráulico pica roca Beta 81 de la mina subterránea. Este mantenimiento de equipo se realizó aprovechando corte de energía en planta y contó con la participación del área de mantenimiento divisional y corporativo, C+ Andina, C+ Chuquicamata y C+ Corporativo. Esta fue la primera vez que se implementó SMED en la división y que contó con el apoyo de Casa Matriz y División Chuquicamata asumiendo roles de mentoría. En una primera instancia, la carta Gantt consideraba 200 horas para el montaje y desmontaje de cabezal, pluma, boom, cilindros, entre otros componentes (ver **Figura 2.13**). Luego del taller SMED, la carta Gantt se redujo a un total 160 horas aplicando la metodología, es decir, 40 horas menos que en la inicial. Sin embargo, la ejecución del mantenimiento resultó en un total de 166,5 horas, siendo un valor menor al inicial (33,5 horas menos) pero levemente mayor que la teoría que implicaba SMED (6,5 horas más). Se estima que el cambio de los componentes tuvo un costo de US\$ 8.770 lo que involucró el mantenimiento, componentes y el corte de energía (Codelco - División Andina, 2022a). Dentro de las mayores complicaciones se menciona que área de operaciones modificó en varias ocasiones el corte de energía lo que afectaba la ejecución del mantenimiento y que una tarea de montaje no cumplió con el estándar lo que causó un retraso de 6 horas aproximadamente.



de utilidad para el comienzo de un futuro VSM a nivel divisional. Dicha información tiene relación con las empresas que suministran a la planta, cómo se efectúa el flujo de información, cómo se regulan ciertas máquinas, entre otros. Dentro de las empresas que suministran y prestan servicios a División Andina se encuentran:

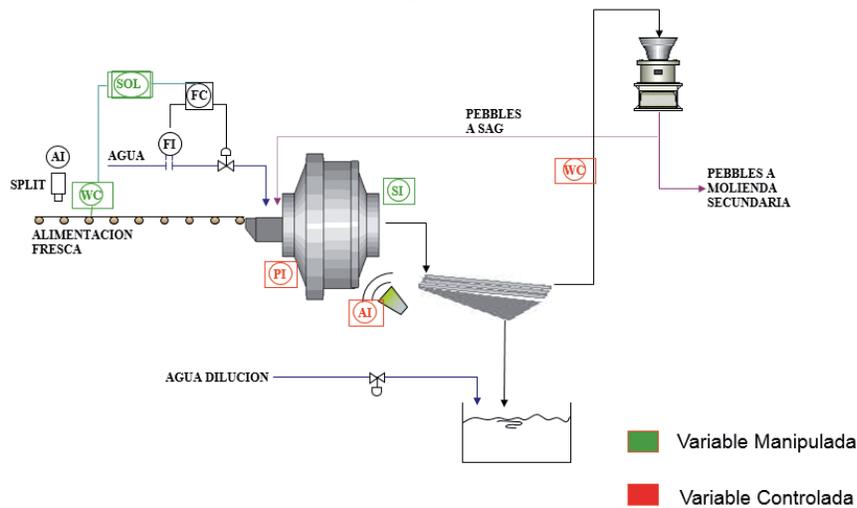
- Siemens: empresa alemana que presta servicios de mantenimiento y repuestos de pernería y niplería al molino SAG.
- Nexxo: empresa que otorga servicios industriales y de ingeniería aplicada con contrato en División Andina. Es una de las empresas participantes para la mantención de molinos verticales que se ejecutará en agosto de este año.
- Metso: empresa de la industria minera y metalúrgica que presta servicios de mantenimiento y de soluciones ingenieriles al molino unitario 2.
- Komatsu: empresa japonesa que proporciona maquinaria y vehículos para la división.

En términos de flujo de la información, PI System recopila datos asociados a mediciones y detenciones de las máquinas y equipos. Por otro lado, a través de la plataforma SisApp, se lleva registro de las operaciones y tareas que los operadores realizan día a día y que es utilizada desde C+ para el apoyo y gestión en labores de terreno a través de lo que se denomina internamente como Rutas Críticas. En cuanto al control de equipos (ver **Figura 2.14** y **Figura 2.15**), en MSAG y MUN2 existen variables que son manipuladas manualmente y otras que son controladas remotamente vía Sistema PROFIT (Fernández Guerra, 2015).



Fuente: Análisis Multivariable para la Gestión Operativa para Molienda Línea SAG, Codelco División Andina - Felipe Fernández Guerra

**Figura 2.15: Variables Manipuladas y Controladas de MUN2**



Fuente: Análisis Multivariable para la Gestión Operativa para Molienda Línea SAG, Codelco División Andina - Felipe Fernández Guerra

A pesar de que la herramienta VSM no se logró desarrollar de la manera planteada en un comienzo, se desarrolló una alternativa a modo de cumplir con los objetivos de este informe: el diagrama SIPOC (*Suppliers, Inputs, Process, Outputs and Customers*). Un diagrama SIPOC ayuda a recolectar e identificar información del proceso, en este caso, de la planta concentradora de manera cualitativa definiendo claramente las actividades clave, las entradas con sus respectivos proveedores, las salidas del proceso y los clientes internos o externos (N & S, 2011). Una diferencia entre esta herramienta y el VSM es que en el segundo caso se hace énfasis en los flujos, producción y tiempos de manera cuantitativa. En la **Figura 2.16** se muestra la aplicación de esta herramienta en la planta con la información recabada.

**Figura 2.16: Diagrama SIPOC del Área de Moliendas**

| Proveedores         | Entradas  | Proceso  | Salidas   | Cliente                                |
|---------------------|---|--|---|--|
| Siemens             | Pernería y Niplería   | Ingreso de Mineral desde Tolvas                            | Mineral de Cobre y Molibdeno en Forma de Pulpa  | Flotación (Concentrado Mixto y Relave) |
| Nexxo               | Herramientas  | Molienda de Mineral  | Resultados de Estado de Equipos y Variables Disponibles para Descargas desde Software | Gerencia de la División                |
| Metso               | Diseños de Ingeniería   | Añadidura de Agua y Cal Generando Pulpa que va a Flotación | Equipos Disponibles para Uso y Calibrados   |  |
| División Andina (*) | Flujo de Mineral y Cal  | Servicios de Mantenimiento e Ingeniería Aplicada           |   |  |
| SAP ERP             | Flujo de Información de Plan Matriz                               | Confirmación y Revisión de Procesos                        |   |  |
| PI System           | Flujo de Información de Detenciones de Equipos                    | Procesamiento de Datos                                     |   |  |
| Sistema PROFIT      | Flujo de Datos de Estados de Variables Manipuladas y Controladas  | Control de Variables Manipuladas y Controladas             |   |  |
| SisApp              | Flujo de Información de Rutas Críticas y Procedimientos en Planta | Calibración de Sensores                                    |   |  |
| Komatsu             | Maquinaria y Vehículos  | Operación de Maquinaria                                    |   |  |

(\*) Entiéndase a la División Andina como proveedor interno de materia prima (mineral de cobre, molibdeno y cal) desde la mina a rajo abierto pasando por los procesos sucesivos (chancado y prechancado) hasta llegar a las tolvas de las moliendas del estudio

Fuente: Elaboración propia

## 2.5 Análisis Seis Sigma del Proceso

En esta sección se muestra un punto de partida, en base a los resultados del análisis Seis Sigma, para establecer un precedente y posterior estandarización de la metodología aplicada a las áreas productivas de la División Andina. Se comienza el análisis presentando las variables de calidad del proceso, estudio sobre la capacidad y métricas del proceso y finalmente presentando las causas de los problemas (o fallas) y sus efectos sobre el tratamiento de mineral en la planta concentradora.

### 2.5.1 Variables de Calidad del Proceso (Definir y Medir)

Las variables de calidad analizadas son las que son de importancia para el cliente (en este caso interno debido a la etapa del proceso en la que se encuentran las moliendas) y que están definidas en un documento oficial llamado *Estándares Operacionales de Ingeniería de Procesos de la Gerencia de Plantas* (Codelco - División Andina - Ingeniería de Procesos, 2021). Los valores mínimos (límite inferior de especificación o LIE) y máximos (límite superior de especificación o LSE) permitidos

junto con las variables estudiadas se presentan en la **Tabla 2.12**. Cada valor está acompañado por su respectiva unidad en la columna dos mientras que la columna tres detalla el significado de la variable. Es importante destacar que estas son variables de calidad del proceso y no del producto debido a que se analizó una parte del proceso productivo de cobre donde las variables operacionales cobran una alta relevancia. Además, dentro de la metodología DMAIC, este representa la primera y segunda etapa, definir y medir respectivamente. El diagrama SIPOC mostrado en la sección 2.4 es una herramienta utilizada para la etapa Medir y se presentó de tal manera que siguiera una línea lógica con lo discutido en dicha sección y hacer más fácil la lectura.

**Tabla 2.12: Estándares Operacionales de Moliendas**

| Área | Estándar Operacional     | Detalle                                   | Mínimo (LIE) | Máximo (LSE) |
|------|--------------------------|---|--------------|--------------|
| MSAG | Potencia de Trabajo (kW) | Potencia de trabajo de molino SAG         | -            | 12.500       |
|      |                          | Potencia de trabajo de molino de bolas 1  | 5.500        | 5.800        |
|      |                          | Potencia de trabajo de molino de bolas 2  | 5.500        | 5.800        |
| MUN2 | Potencia de Trabajo (kW) | Potencia de trabajo del molino unitario 2 | 12.800       | 13.500       |

Fuente: Elaboración propia

De los datos, se tomaron 24 observaciones diarias por los 365 días del año 2021 resultando un total de 8760 observaciones a través del software PI System (ver **Tabla 2.13**). De estos valores resultaron 1176 y 1200 observaciones no válidas que incluían el tag (etiqueta): [-11059] No Good Data For Calculation. Estos datos no válidos, y posteriormente filtrados del análisis, concuerdan con los 49 y 50 días en que no hubo tratamiento de mineral por razones ya expuestas anteriormente (principalmente huelga, mantenimientos y encierro por invierno).

**Tabla 2.13: Estadísticas Descriptivas de las Variables de Calidad**

| Estadísticas / Variable        | Potencia MSAG [kW] | Potencia Molino de Bolas 1 [kW] | Potencia Molino de Bolas 2 [kW] | Potencia MUN2 [MW] |
|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Tag                            | MSAG:JI315_FIX     | MSAG:JI363_FIX                  | MSAG:JI383_FIX                  | MSAG_H.3300_ML_JI  |
| Total de Datos                 | 8.760              | 8.760                           | 8.760                           | 8.760              |
| Datos No Válidos               | 1.176              | 1.176                           | 1.176                           | 1.200              |
| Datos Válidos                  | 7.584              | 7.584                           | 7.584                           | 7.560              |
| Porcentaje de Datos No Válidos | 13,4%              | 13,4%                           | 13,4%                           | 13,7%              |
| Porcentaje de Datos Válidos    | 86,6%              | 86,6%                           | 86,6%                           | 86,3%              |
| Media                          | 11.252,0           | 5.650,2                         | 5.713,2                         | 13,1               |
| Desviación Estándar            | 863,3              | 93,7                            | 130,5                           | 0,1                |
| Mínimo                         | 8.300,7            | 5.302,4                         | 5.272,0                         | 12,8               |
| Máximo                         | 14.589,6           | 6.001,2                         | 6.154,9                         | 13,5               |
| Rango                          | 6.288,9            | 698,8                           | 882,9                           | 0,7                |

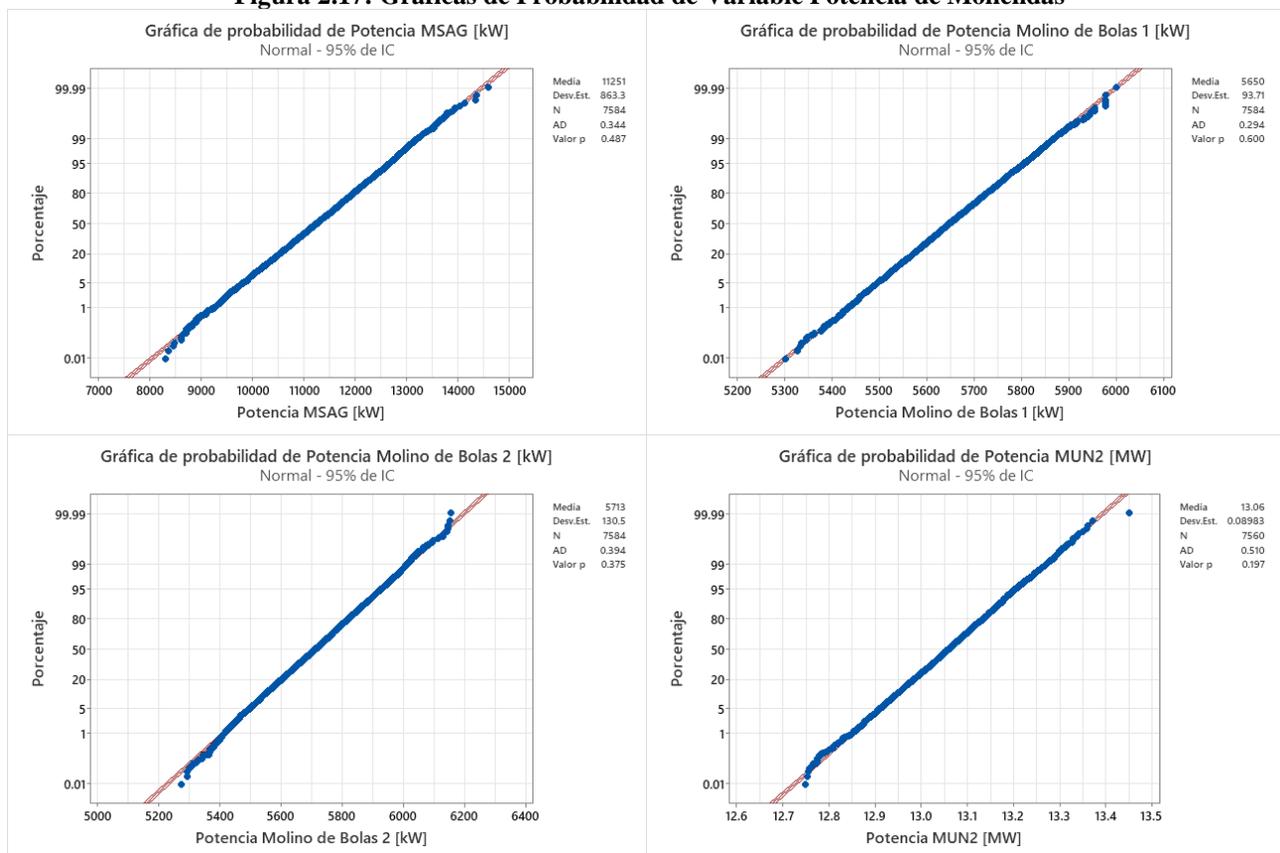
Fuente: Elaboración propia

## 2.5.2 Métricas Seis Sigma y Capacidad del Proceso (Analizar)

Mediante el software Minitab, se analizaron los datos del año 2021 realizando pruebas de normalidad, gráficos de control, y análisis de capacidad de procesos para así estimar el nivel Sigma de las operaciones involucradas.

- Pruebas de Normalidad: para las cuatro series de datos se aplicó la prueba de normalidad (no paramétrica) Kolmogorov-Smirnov con un 95% de nivel de confianza. Utilizando el valor-p como criterio para aceptar o rechazar la hipótesis nula en todos los casos el valor-p era mayor que 0,05 (ver **Figura 2.17**) por lo que no había prueba suficiente para rechazar  $H_0$  (los datos siguen una distribución normal). Se eligió esta prueba porque además de ser una herramienta de Minitab, es una prueba muy potente para muchos datos en este análisis (Gandica de Roa, 2020).

**Figura 2.17: Gráficas de Probabilidad de Variable Potencia de Moliendas**



Fuente: Elaboración propia

▪ Capacidad y Métricas Seis Sigma:

**Tabla 2.14: Métricas de Capacidad y 6σ**

| Área | Variable de Calidad             | Índice/Métrica    | Significado | Nivel Sigma (3*C <sub>pk</sub> )  |      |
|------|---------------------------------|-------------------|-------------|---|------|
| MSAG | Potencia MSAG [kW]              | C <sub>p</sub>    | -           | -   | -    |
|      |                                 | C <sub>pi</sub>   | -           | -   | -    |
|      |                                 | C <sub>ps</sub>   | 0,48        | Proceso muy deficiente con un límite superior con mayor densidad de datos en la izquierda | -    |
|      |                                 | C <sub>pk</sub>   | 0,48        | Capacidad del proceso es muy deficiente   | 1,44 |
|      |                                 | PPM (Corto Plazo) | 73.570,00   | Por cada millón existen 73.570,00 defectos  | -    |
|      | Potencia Molino de Bolas 1 [kW] | C <sub>p</sub>    | 0,53        | Proceso requiere urgentemente modificaciones  | -    |
|      |                                 | C <sub>pi</sub>   | 0,53        | Proceso muy deficiente centrado   | -    |
|      |                                 | C <sub>ps</sub>   | 0,53        | Proceso muy deficiente centrado   | -    |
|      |                                 | C <sub>pk</sub>   | 0,53        | Capacidad del proceso es muy deficiente   | 1,59 |
|      |                                 | PPM (Corto Plazo) | 109.239,14  | Por cada millón existen 109.239,14 defectos   | -    |
|      | Potencia Molino de Bolas 2 [kW] | C <sub>p</sub>    | 0,38        | Proceso requiere urgentemente modificaciones  | -    |
|      |                                 | C <sub>pi</sub>   | 0,54        | Proceso muy deficiente más cercano al límite superior de especificación                   | -    |
|      |                                 | C <sub>ps</sub>   | 0,22        | Proceso muy deficiente más cercano al límite superior de especificación                   | -    |
|      |                                 | C <sub>pk</sub>   | 0,22        | Capacidad del proceso es muy deficiente   | 0,66 |
|      |                                 | PPM (Corto Plazo) | 304.231,86  | Por cada millón existen 304.231,86 defectos   | -    |
| MUN2 | Potencia MUN2 [MW]              | C <sub>p</sub>    | 1,30        | Proceso adecuado que requiere control   | -    |
|      |                                 | C <sub>pi</sub>   | 0,96        | Proceso no adecuado con tendencia al límite inferior                                      | -    |
|      |                                 | C <sub>ps</sub>   | 1,64        | Proceso adecuado alejado del límite superior de especificación                            | -    |
|      |                                 | C <sub>pk</sub>   | 0,96        | Proceso no es adecuado y requiere un análisis más exhaustivo                              | 2,88 |
|      |                                 | PPM (Corto Plazo) | 1.907,87    | Por cada millón existen 1.907,87 defectos   | -    |

Fuente: Elaboración propia

De la **Tabla 2.14**, se deduce que ninguno de los equipos tiene un nivel Seis Sigma o cercano. El proceso con mayor nivel es el de la molienda unitaria 2 con un valor Sigma de 2,88. Inclusive así, ni siquiera se logra el nivel 3 Sigma.

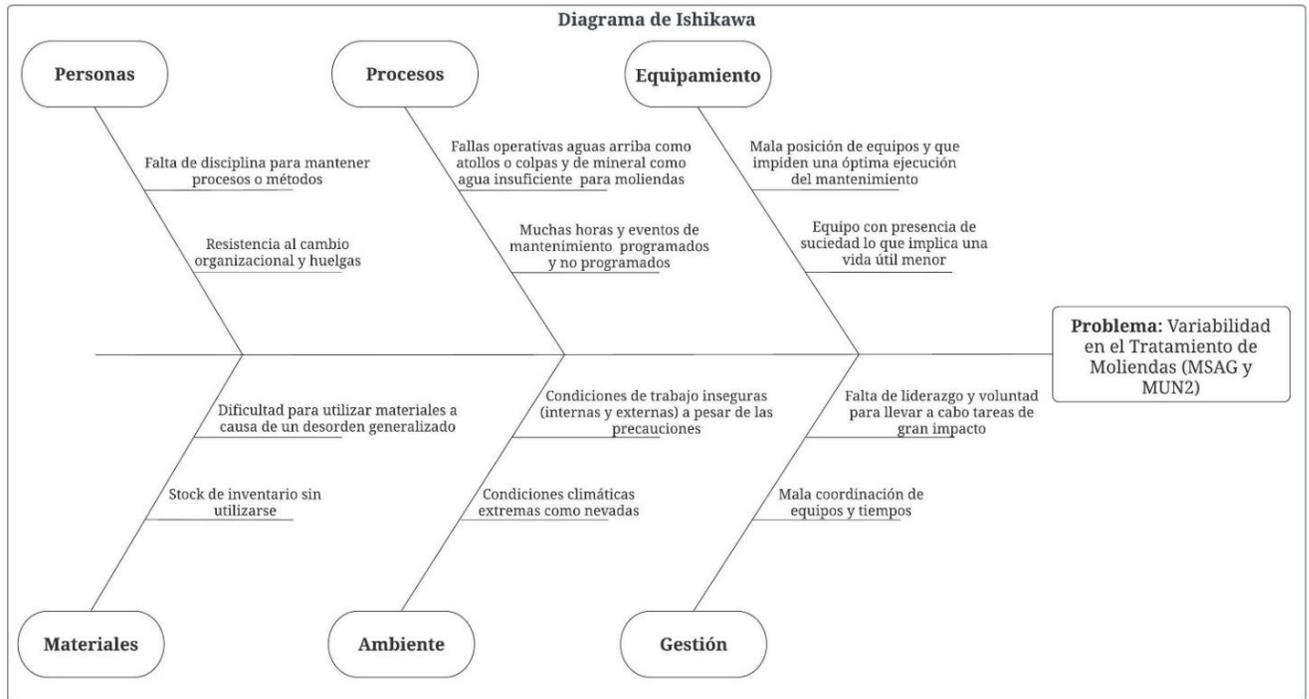
En el Anexo F, se muestran los gráficos de control X-Barra y S-Barra para los datos de las variables. El objetivo de haber realizado este análisis es distinguir entre variaciones de un proceso de causas comunes y causas especiales. Si bien los gráficos mantienen cierta estabilidad, existen puntos fuera de los límites de control, por lo que estos procesos podrían no estar en control y se debiesen estudiar a fondo las causas las que, por análisis previo, podrían ser causadas por fallas, variaciones de potencia por detenciones abruptas aguas arriba o aguas abajo del proceso o por una manipulación inadecuada de estas variables. Además, los gráficos muestran una gran densidad de puntos cerca de la tendencia central y con varios de estos muy cercanos a los límites de control inferior y superior. Este proceso, dicho en otras palabras, requiere un control estricto y un análisis técnico de terreno para evaluar las condiciones y sistemas de potencia de trabajo de las máquinas. Una vez solucionadas estas causas fuera de control se debe realizar nuevamente este análisis para saber si se realizó de manera correcta la aplicación de esta herramienta. En caso de que no se hayan solucionado, se debe seguir en la búsqueda de las mejoras que estabilicen el proceso.

- Diagrama de Ishikawa de Causa y Efecto

El Diagrama de Ishikawa (o *Fishbone Diagram*), fue creado por Karou Ishikawa como una herramienta de gestión para analizar causalidades de los problemas. Luego del análisis previamente mostrado, se muestran las causas estudiadas a través del estudio, observación y experiencias que causan el problema descrito inicialmente. Las seis ramificaciones contemplan las categorías que afectan al problema raíz y dan una idea clara de las causas que pudiesen estar afectando dicho resultado. También este diagrama puede utilizarse para implementar estrategias o planes de mejora cambiando las preguntas ¿Por qué? del caso mostrado por preguntas del tipo ¿Cómo? (Beltrán Jaramillo, 2005). En la **Figura 2.18** se muestra el Diagrama de Ishikawa para este estudio. Lo que en el diagrama de Ishikawa se muestra, son los resultados producto de la observación, investigación y análisis de los principales procesos que tienen lugar en la planta concentradora. Dentro de las más significativas, se encuentran aquellas relacionadas a procesos donde las continuas fallas operativas,

ya sean aguas arriba o aguas abajo, dificultan la correcta labor y por ende influyen en la cantidad de mineral tratado que pasa al área de flotación.

**Figura 2.18: Diagrama de Ishikawa para Causa y Efecto del Problema**



Fuente: Elaboración propia

### 3. Capítulo III: Discusión y Conclusiones

---

#### 3.1 Discusión

Si se tienen en cuenta los objetivos definidos en este trabajo, es posible afirmar que el análisis y los resultados fueron presentados para que el lector lograra responder a las preguntas que probablemente se generó al inicio del informe. Probablemente hayan surgido otras preguntas como: ¿cómo asegurar la aplicación de Seis Sigma a nivel divisional o corporativo? ¿Es la única alternativa? ¿Se justifica su uso? Estas preguntas y las que se haya formado el lector, muy seguramente se podrían tratar en el futuro a desarrollar en mayor detalle o en otra dirección que se estime.

Se puede afirmar que las herramientas *Lean* dan mecanismos para obtener puntos de vistas que aseguren una mejora continua. Es menester que quienes apliquen estas herramientas desarrollen y motiven en las personas la disciplina, la que probablemente, sea la habilidad más difícil de aplicar incluso más que lograr un nivel Seis Sigma de un proceso. Aquí cobra un rol muy trascendental los equipos de trabajo, recursos humanos, el ambiente laboral y por, sobre todo, la cultura organizacional de la empresa.

Por otro lado, este trabajo planteó objetivos que fueran alcanzables dentro de un rango de tiempo razonable si se quisiesen aplicar estas herramientas en el futuro y en áreas de trabajo donde resulten ser de utilidad. Además, los resultados muestran indicios de que existen puntos a mejorar en términos productivos lo que lleva a pensar en soluciones sobre cómo y cuáles son las mejores formas de lograr impactar en las personas a través de la gestión del cambio y cultura organizacional.

Finalmente, es interesante los distintos modos en que un problema puede resolverse y debe entenderse que existen múltiples mecanismos y herramientas cuantitativas que permiten lograr este objetivo. Dicho esto, es importante finalizar con que la gestión es esencial para lograr que las cosas ocurran en una determinada dirección y así mejorar la calidad en los distintos aspectos del trabajo.

### 3.2 Conclusiones

Si bien Codelco y la División Andina producen cobre de alta calidad y que generan excedentes de muchos millones de dólares para el país, es interesante que a pesar de lo anteriormente dicho existan ciertos puntos a mejorar en niveles productivos y en gestión de la calidad. Tomando en cuenta lo que sucede en la actualidad en la bodega Siemens-Andina, resulta preocupante que no exista una responsabilidad compartida por ambas empresas y un control sobre el inventario. También es entendible desde el punto de vista de las jornadas, las cuales son altamente demandantes y que sea una causa para una mejora más lenta en este aspecto.

Por otro lado, es imperativo tener como base fundamental la seguridad de los trabajadores de la planta con un fuerte compromiso y confianza en la delegación de responsabilidades y tareas de alto impacto en los distintos niveles jerárquicos. Un ejemplo de esto es la contaminación por material particulado en la bodega producto de la chimenea de la planta concentradora y el cómo se relaciona con las distintas partes de la empresa. También resulta muy interesante y desafiante el desarrollar técnicas que ayuden en la mejora de la disciplina de las personas para alcanzar los distintos objetivos que se fijen en los equipos de trabajo.

El método 5S resulta muy útil a pesar de no ser de una alta complejidad. Sin embargo, una buena aplicación puede tener un gran efecto positivo en las áreas de trabajo. Siguiendo la misma línea argumentativa, los hallazgos 5S implican que debe existir urgentemente una intervención que involucre el compromiso de todos los trabajadores y directivos de la planta para lograr una estandarización interna y una disciplina estoica.

Un aspecto que resulta curioso es que no hay existencia (al menos conocida por los trabajadores) de planos o *layouts* de nivel técnico, los que pudiesen ser de ayuda en temas de seguridad, planificación, operación, mantenimiento, entre otros.

Además, el tonelaje de entrada a las moliendas debe ser meticulosamente estudiado con foco en los aspectos que ocurren aguas abajo. Esto hace alusión a detenciones por sobreproducción o fallas que no permitan un flujo continuo de mineral.

En cuanto a los aspectos más productivos y metas, las huelgas y condiciones climáticas tienen un alto efecto sobre el tratamiento de planta. A pesar de que existan medidas para mitigar el déficit productivo como planificar sobre una base anual de 360 días (5 feriados irrenunciables para compensar el déficit) no resultó ser suficiente para llegar a la meta.

La priorización de equipos para mantenimientos, especialmente los no programados, deben cruzar la información por horas y eventos y ordenar siempre en base a las horas como criterio de prioridad teniendo en cuenta el impacto económico que pudiese causar una detención duradera. Ante la aplicación SMED se recomienda utilizar herramientas como el método PERT, planos y diseños para así tener herramientas más robustas y visuales en el análisis desde una apertura de miras de quienes implementarán el método en cuestión.

El análisis Seis Sigma verificó (y puede ayudar a verificar para otros casos) que los procesos estudiados no son de calidad mundial y esto pone sobre la discusión la necesidad de evaluar los procesos desde un punto de vista de calidad paralelamente al que ya se tiene en materia productiva. Un punto de inicio ideal sería comenzar analizando el correcto funcionamiento de las máquinas que tienen problemas mecánicos, eléctricos e hidráulicos principalmente.

Por último, dentro de las limitaciones de este informe se encuentran las complicaciones que resultaron en el análisis de *Value Stream Mapping* la cual radica básicamente en factores geográficos (debido a las medidas tomadas por la pandemia), de datos ya que la demanda de cobre y molibdeno es un cálculo de mayor hermetismo por obvias razones y porque es mucho más recomendable realizar un VSM de toda la División Andina y no solo considerando una pequeña sección dentro del panorama productivo. A pesar de esto, un diagrama SIPOC si bien no reemplaza a un VSM, sí es una buena herramienta para identificar los factores clave de un proceso de manera cualitativa.

### 3.3 Trabajo Futuro Recomendado

El trabajo que se recomienda luego de lo señalado en los capítulos anteriores se encuentra el lograr la certificación divisional en calidad con la norma ISO 9001:2015 a través de una evaluación en profundidad en esta materia. También sería altamente recomendable desarrollar un área o instruir a ingenieros e ingenieras de confiabilidad y de C+ en la metodología Seis Sigma y estudiar el Diseño de Seis Sigma para nuevos proyectos divisionales. En otro aspecto de interés para quien redactó este informe, sería muy interesante desarrollar un análisis desde los procesos y el sesgo de supervivencia que pudiese generarse en un ambiente motivado por los casos de éxito como lo es en el caso de División Andina.

Finalmente, sería muy interesante estudiar las variables fuera de este estudio que, por causa de las limitaciones y diversos factores, no pudieron ser desarrolladas y así poder extender estas herramientas a otras áreas. Sería altamente beneficioso que se conocieran todas estas herramientas y en conjunto con todas las gerencias se logre crear un *Value Stream Mapping* del proceso completo y que incluya todos los factores, entradas, salidas, de material e información, pronósticos de demanda en base al sistema de tipo *Pull* y analizar los cuellos de botella (*bottleneck*) en el panorama general que de por sí es altamente complejo y multivariable.

## 4. Referencias

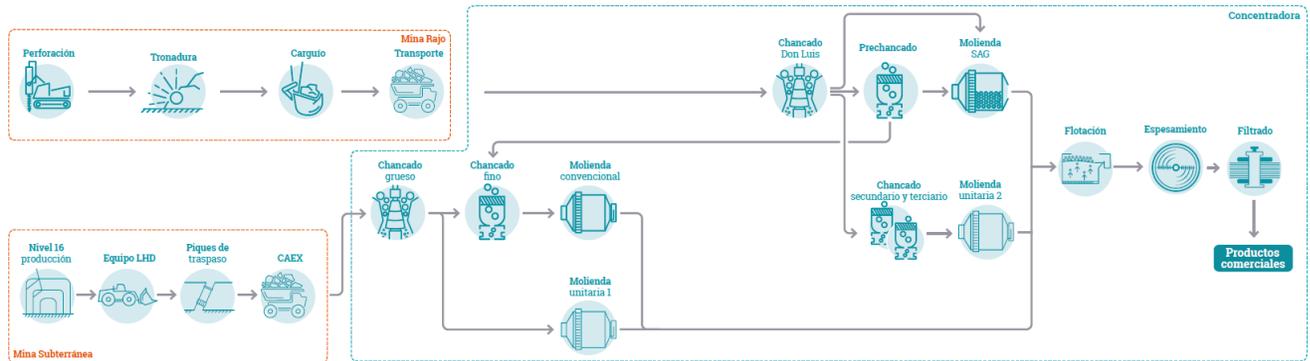
---

- [1]. American Society for Quality. (2022a). *What are the Five S'S (5S) of Lean?* <https://asq.org/quality-resources/lean/five-s-tutorial>
- [2]. American Society for Quality. (2022b). *What is Six Sigma?* <https://asq.org/quality-resources/six-sigma>
- [3]. American Society for Quality. (2022c). *What is Value Stream Mapping (VSM)?* <https://asq.org/quality-resources/lean/value-stream-mapping>
- [4]. Beltrán Jaramillo, J. M. (2005). *Indicadores de Gestión: Herramientas para lograr la competitividad* (Segunda Edición). Panamericana.
- [5]. Codelco. (2017). *MEMORIA ANUAL 2016*.
- [6]. Codelco. (2019). *Molienda*.  
[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda\\_mediata\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda_mediata_t_cnico_060119.pdf)
- [7]. Codelco. (2022a). *División Andina - CODELCO - Corporación Nacional del Cobre*.  
[https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/edic/base/port/andina.html](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/andina.html)
- [8]. Codelco. (2022b). *MEMORIA ANUAL 2021*.
- [9]. Codelco. (2022c). *Nosotros - Historia*. [https://www.codelco.com/historia/prontus\\_codelco/2016-03-22/173042.html](https://www.codelco.com/historia/prontus_codelco/2016-03-22/173042.html)
- [10]. Codelco. (2022d). *Operaciones*.  
[https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/edic/base/port/operaciones.html](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/operaciones.html)
- [11]. Codelco. (2022e). *Proceso productivo*.  
[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/proceso\\_productivo.html](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/proceso_productivo.html)
- [12]. Codelco. (2022f). *Procesos productivos*. [https://www.codelco.com/procesos-productivos/prontus\\_codelco/2011-06-03/221622.html#:~:text=Los%20minerales%20sulfurados%20pasan%20primero,99%20por%20ciento%20de%20pureza.](https://www.codelco.com/procesos-productivos/prontus_codelco/2011-06-03/221622.html#:~:text=Los%20minerales%20sulfurados%20pasan%20primero,99%20por%20ciento%20de%20pureza.)
- [13]. Codelco - División Andina. (2021). *Encuentro DDSS - Gerente General - División Andina*.
- [14]. Codelco - División Andina. (2022a). *Reporte DAND - SMED Cambio Componentes Martillo B81*.
- [15]. Codelco - División Andina. (2022b). *Resultados Año 2021 - División Andina*.
- [16]. Codelco - División Andina - Ingeniería de Procesos. (2021). *Estándares Operacionales - Gerencia de Plantas*.
- [17]. Fernández Guerra, F. (2015). *ANÁLISIS MULTIVARIABLE PARA LA GESTIÓN OPERATIVA PARA MOLIENDA LÍNEA SAG, CODELCO DIVISIÓN ANDINA* [Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]. [http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-0000/UCD0152\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-0000/UCD0152_01.pdf)

- [18]. Gandica de Roa, E. M. (2020). Potencia y Robustez en Pruebas de Normalidad con Simulación Montecarlo. *Revista Scientific*, 5(18), 108–119. <https://doi.org/10.29394/Scientific.issn.2542-2987.2020.5.18.5.108-119>
- [19]. Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma* (Tercera Edición). McGraw-Hill.
- [20]. Imai, M. (2012). *Gemba Kaizen: A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy* (Second Edition). McGraw-Hill.
- [21]. L. George, M., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2004). *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook* (First Edition). McGraw-Hill.
- [22]. Minería Escondida. (2013). *Estándar HSEC - Condiciones básicas en lugar de trabajo*.
- [23]. Minería Chilena. (2009). *La cal: insumo estratégico*. <https://www.mch.cl/reportajes/la-cal-insumo-estrategico/>
- [24]. Minería Chilena. (2012). *Tecnologías para molienda*. <https://www.mch.cl/reportajes/tecnologias-para-molienda/#:~:text=%E2%80%9CLa%20molienda%20unitaria%20con%20HPGR,Jaime%20Morales%20C%20de%20Andina%20244.>
- [25]. N, V., & S, S. (2011). Lean Six Sigma. In *Six Sigma Projects and Personal Experiences*. InTech. <https://doi.org/10.5772/17288>
- [26]. Prensa Codelco. (2022). *Codelco inaugura Sistema Traspaso Mina Planta, proyecto que dará continuidad a la División Andina*. [https://www.codelco.com/codelco-inaugura-sistema-traspaso-mina-planta-proyecto-que-dara/prontus\\_codelco/2022-01-19/135855.html](https://www.codelco.com/codelco-inaugura-sistema-traspaso-mina-planta-proyecto-que-dara/prontus_codelco/2022-01-19/135855.html)
- [27]. Salazar López, B. (2019). *¿Qué es SMED en producción?* <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/produccion/que-es-smed-en-produccion/>

## 5. Anexos

### Anexo A: Diagrama de Flujo de Procesos – División Andina



### Anexo B: Lista de Comprobación del Diagnóstico de las 5S en el Lugar de Trabajo (Formato para Estándar)

| Número de Problemas | Nivel de Calificación |
|---------------------|-----------------------|
| 4 o más             | Nivel 0 (N0)          |
| 3                   | Nivel 1 (N1)          |
| 2                   | Nivel 2 (N2)          |
| 1                   | Nivel 3 (N3)          |
| Ninguno             | Nivel 4 (N4)          |

| Agentes de Cambio Responsables de la Implementación |   |                               | Empresa/División      |    |    |    |    |             |                  |
|---|---|-------------------------------|-----------------------|----|----|----|----|-------------|------------------|
|   |   |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
|   |   |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
|   |   |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
|   |   |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
| Categoría   | Ítem  | Número de Problemas Asociados | Nivel de Calificación |    |    |    |    | Comentarios | Fecha de Chequeo |
|   |   |                               | N0                    | N1 | N2 | N3 | N4 |             |                  |
| Seiri<br>(Clasificar)                               | Se distingue entre lo que se necesita y lo que no se necesita                   |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
|   | Hay equipos, herramientas, muebles, etc. innecesarios                           |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
|   | Hay elementos innecesarios están en las paredes, tablonces de anuncios, etc.    |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
|   | Hay artículos presentes en pasillos, escaleras, esquinas, etc.                  |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
|   | Se presentan inventarios, suministros, piezas o materiales innecesarios         |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |
|   | Existen riesgos de seguridad (agua, aceite, productos químicos, máquinas, etc.) |                               |                       |    |    |    |    |             |                  |

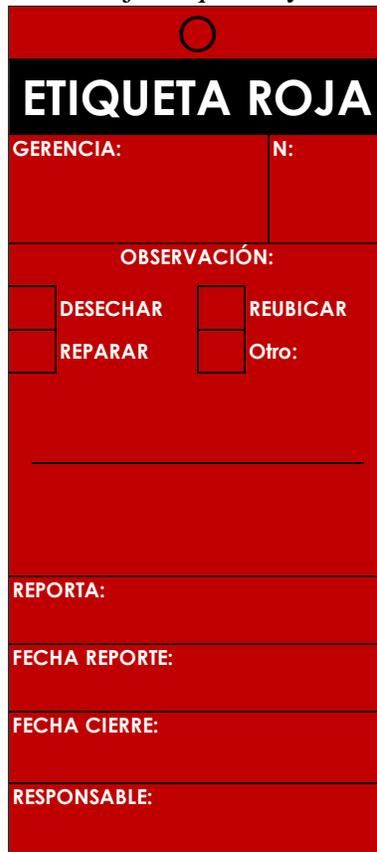
Anexo B: Continuación

|                                    |   |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <b>Seiton<br/>(Ordenar)</b>        | Existe un lugar para cada cosa y cada cosa en su lugar  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Los lugares correctos para los artículos no son obvios  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Los objetos no están en su sitio  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | No se indican los pasillos, los puestos de trabajo ni la ubicación de los equipos             |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Los artículos no se guardan inmediatamente después de su uso                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Los límites de altura y cantidad no son evidentes   |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Seiso<br/>(Limpieza)</b>        | Limpieza y búsqueda de formas de mantener limpio y organizado                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Los suelos, paredes, escaleras y superficies no están libres de suciedad, aceite y grasa      |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | El equipo no se mantiene limpio y libre de suciedad, aceite y grasa                           |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Los materiales de limpieza no son fácilmente accesibles                                       |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Las líneas, las etiquetas, los letreros, etc. no están limpios ni rotos                       |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Hay otros problemas de limpieza de cualquier tipo   |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Seiketsu<br/>(Estandarizar)</b> | Mantener y controlar las tres primeras categorías   |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | La información necesaria no es visible  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Las normas no son conocidas ni visibles   |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | No existen listas de comprobación para los trabajos de limpieza y mantenimiento               |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Todas las cantidades y límites no son fácilmente reconocibles                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | ¿Cuántos artículos no se pueden localizar en 30 segundos?                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Shitsuke<br/>(Disciplina)</b>   | Se respetan las normas  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | ¿Cuántos trabajadores no han recibido formación sobre las 5S?                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | ¿Cuántas veces, la semana pasada, no se realizaron las 5S diarias?                            |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Número de veces que los objetos personales no están bien guardados                            |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Número de veces que las ayudas al trabajo no están disponibles o no están actualizadas        |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                    | Número de veces, en la última semana, que no se realizaron las inspecciones diarias de las 5S |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Total</b>                       |   |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Puntaje</b>                     |   |  |  |  |  |  |  |  |  |

Anexo B: Continuación

| <b>Evaluación</b> | <b>Rango para Calificación</b> |     |
|-------------------|--------------------------------|-----|
| Excelente         | 91                             | 120 |
| Bueno             | 61                             | 90  |
| Regular           | 31                             | 60  |
| Pésimo            | 0                              | 30  |

Anexo C: Etiqueta Roja para Áreas de Trabajo Pequeñas y Medianas (Formato para Estándar)



The image shows a vertical red tag form template. At the top, there is a small white circle. Below it, the text "ETIQUETA ROJA" is written in large, bold, white capital letters on a black background. The form is divided into several sections by white lines. The first section contains two fields: "GERENCIA:" and "N:". The second section is labeled "OBSERVACIÓN:" and contains four checkboxes with labels: "DESECHAR", "REUBICAR", "REPARAR", and "Otro:". Below these checkboxes is a horizontal line. The third section is labeled "REPORTA:". The fourth section is labeled "FECHA REPORTE:". The fifth section is labeled "FECHA CIERRE:". The sixth section is labeled "RESPONSABLE:".

Anexo D: Carteles Rojos para Áreas de Trabajo Grandes (Formato para Estándar)

|                           |                             |
|---------------------------|-----------------------------|
| <b>DESECHOS</b>           | <b>CONDICIÓN INSEGURA</b>   |
| RESPONSABLE:              | FECHA:                      |
|                           | HORA:                       |
| RESPONSABLE:              | FECHA:                      |
|                           | HORA:                       |
| <b>DIFÍCIL ACCESO</b>     | <b>ELEMENTO INNECESARIO</b> |
| RESPONSABLE:              | FECHA:                      |
|                           | HORA:                       |
| RESPONSABLE:              | FECHA:                      |
|                           | HORA:                       |
| <b>FUENTE DE SUCIEDAD</b> | <b>FOCO DE SUCIEDAD</b>     |
| RESPONSABLE:              | FECHA:                      |
|                           | HORA:                       |
| RESPONSABLE:              | FECHA:                      |
|                           | HORA:                       |

Anexo D: Continuación

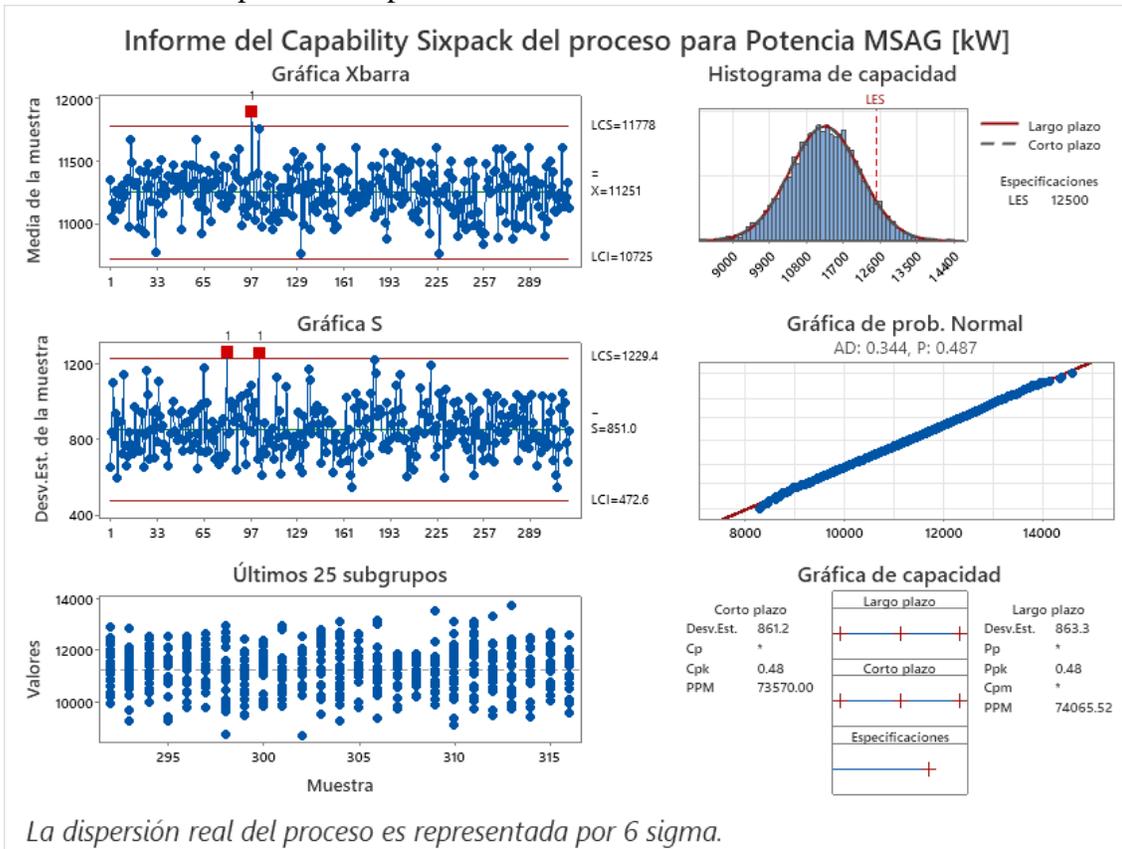
# DESORDEN

|                     |               |
|---------------------|---------------|
| <b>RESPONSABLE:</b> | <b>FECHA:</b> |
|                     | <b>HORA:</b>  |

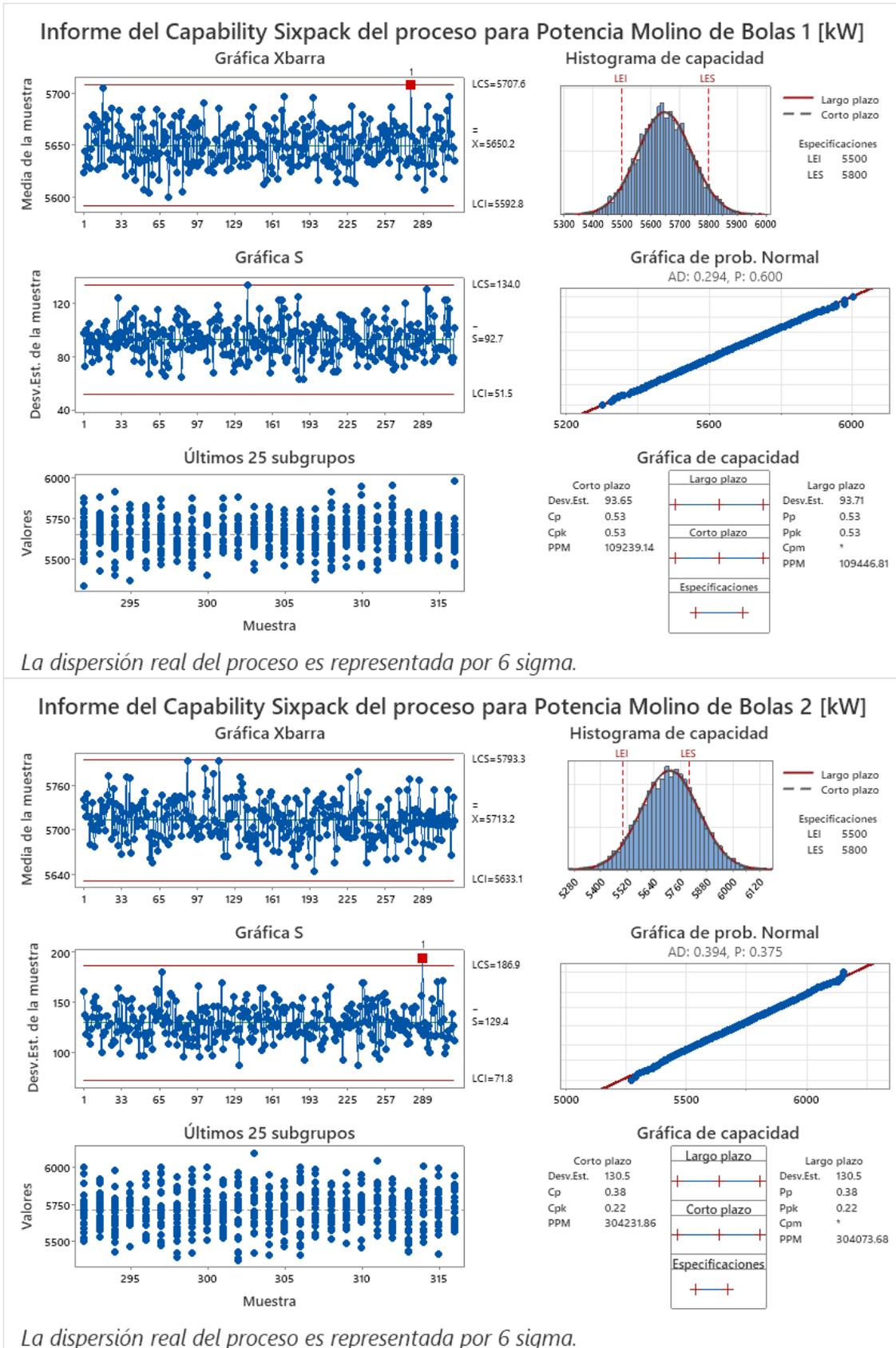
Anexo E: Lista de Hallazgos en Inspección de Área (Formato para Estándar)

| Área:                     |               | Nombre:  |                    |                |                      | Cargo:             |                  |          | Día y Hora de Inspección: |
|---------------------------|---------------|----------|--------------------|----------------|----------------------|--------------------|------------------|----------|---------------------------|
| N°                        | Área / Equipo | Desechos | Condición Insegura | Difícil Acceso | Elemento Innecesario | Fuente de Suciedad | Foco de Suciedad | Desorden | Comentario / Registro     |
| 1                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 2                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 3                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 4                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 5                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 6                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 7                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 8                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 9                         |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 10                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 11                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 12                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 13                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 14                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 15                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 16                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 17                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 18                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 19                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 20                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 21                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 22                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 23                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 24                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| 25                        |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |
| <b>Total de Hallazgos</b> |               |          |                    |                |                      |                    |                  |          |                           |

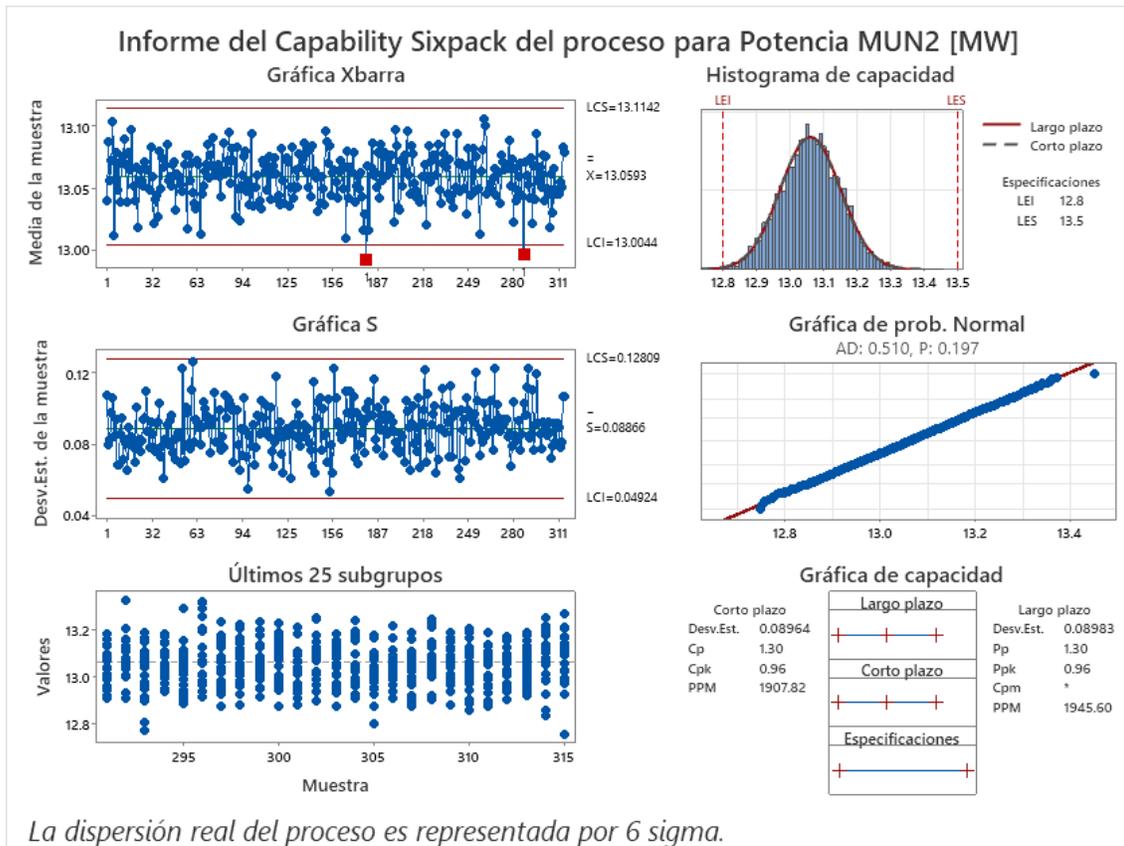
## Anexo F: Análisis de Capacidad Sixpack de los Procesos



Anexo F: Continuación



Anexo F: Continuación



## 6. Resumen FI

---

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

### RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

**Departamento:** Departamento de Ingeniería Industrial

**Carrera:** Ingeniería Civil Industrial

**Nombre del memorista:** Patricio Alejandro Soto Jara

**Título de la memoria:** Propuesta de un modelo de mejora continua basado en herramientas Lean con enfoque Seis Sigma en planta concentradora de empresa minera

**Fecha de la presentación oral:**

**Profesor(es) Guía:** Dr. Hernaldo Reinoso Alarcón

**Profesor(es) Revisor(es):** Dr. Pablo Catalán Ramírez

**Concepto:**

**Calificación:**

| Resumen (máximo 200 palabras) |
|-------------------------------|
|-------------------------------|

|  |
|--|
| <p>Este estudio presenta las problemáticas que se encuentran en dos moliendas de una planta concentradora de una empresa minera, la Corporación Nacional del Cobre en la División Andina. Dichas problemáticas, de carácter productivo y de gestión de calidad, son abordadas con ayuda de análisis basados en herramientas <i>Lean</i>, las cuales tienen su origen en Toyota. Estas herramientas han sido mejoradas y ajustadas para cada necesidad a lo largo del tiempo y sentó las bases para lo que se conoce como Seis Sigma y <i>Lean</i> Seis Sigma (Motorola). En División Andina, actualmente existen aplicaciones de herramientas <i>Lean</i> mas no de Seis Sigma. Las herramientas <i>Lean</i> utilizadas para el desarrollo fueron método 5S, SMED, VSM y Seis Sigma. Se aplicó el método 5S en una bodega de la empresa Siemens y en área de moliendas. Para SMED, se realizó un análisis de los tiempos y motivos por equipos que causan detenciones en el proceso a través de gráficos de Pareto. Para VSM en cambio, se presentan las limitaciones de la realización y se propone una alternativa: diagrama SIPOC. Es importante destacar que, de las variables analizadas en las moliendas, ninguna alcanza el nivel seis sigma lo que se detalla en sección Resultados.</p> |
|--|

