

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Análisis de causa raíz de las fallas de los molinos SAG para mejorar la disponibilidad en la unidad minera Constancia

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por

Marx Irving Salazar Reynaga

 [0009-0007-7251-7999](https://orcid.org/0009-0007-7251-7999)

Asesor

MSc. Nombres y Apellidos Completos

 [0000-0001-8672-1234](https://orcid.org/0000-0001-8672-1234)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Salazar Reynaga [1]
Referencia/Reference	[1] N. Salazar Reynaga, “ <i>Análisis de causa raíz de las fallas de los molinos SAG para mejorar la disponibilidad en la unidad minera Constancia</i> ” [Trabajo de Suficiencia Profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Salazar, 2024)
Referencia/Reference	Salazar, M. (2024). <i>Análisis de causa raíz de las fallas de los molinos SAG para mejorar la disponibilidad en la unidad minera Constancia</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Resumen

El sector minero enfrenta el desafío de mejorar la competitividad y eficiencia en un entorno con altas exigencias operativas. En este contexto, los molinos SAG desempeñan un papel crucial al procesar grandes volúmenes de mineral. Con ello, esta investigación aborda las frecuentes fallas de estos equipos en la unidad minera Constancia, las cuales reducen su disponibilidad y aumentan los costos operativos.

De este modo, el objetivo fue analizar las fallas en los molinos SAG en el período de 2022 al 2024 para mejorar su disponibilidad, siguiendo un estudio del tipo aplicado, con un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental, usando herramientas como el análisis de Pareto, Jack Knife y el análisis de causa raíz que permitieron identificar patrones de fallas y proponer estrategias de mantenimiento acorde a las situaciones y paradas presentadas en el contexto operativo actual.

Cabe resaltar, que la aplicación de estas técnicas de análisis, alineadas a las normativas internacionales, ha permitido focalizar los esfuerzos de mantenimiento en los equipos más críticos y en los modos de falla que mayor impacto han tenido en el desempeño de los molinos SAG, tal es así que los planes de acción propuestos e implementados para la caída de mallas de trommel tuvieron como objetivo incrementar en 0.58% la disponibilidad de la planta.

Finalmente, se mejoraron las estrategias de gestión de fallas para los molinos SAG mediante la actualización de procedimientos, la estandarizaron de repuestos, la capacitación del personal técnico y la reevaluación de la confiabilidad de los componentes de las mallas de trommel. Con estas acciones, se pretende mitigar las fallas y alcanzar los índices de productividad proyectados, estableciendo una referencia para otras unidades mineras con problemas similares y contribuyendo, de este modo, a mantener una minería más eficiente.

Palabras clave: Molinos SAG, disponibilidad, mantenimiento preventivo, análisis de fallas, mallas de trommel, minería, ACR, Pareto, Jack Knife, eficiencia operativa.

Abstract

The mining sector faces the challenge of improving competitiveness and efficiency in an environment with high operational demands. In this context, SAG mills play a crucial role when processing large volumes of ore. With this, this research addresses the frequent failures of this equipment in the Constancia mining unit, which reduce its availability and increase operating costs.

In this way, the objective was to analyze the failures in SAG mills in the period from 2022 to 2024 to improve their availability, following a study of the type applied, with a mixed approach and a non-experimental design, using tools such as Pareto analysis, Jack Knife and root cause analysis that allowed identifying failure patterns and proposing maintenance strategies according to the situations and shutdowns presented in the operational context current.

It should be noted that the application of these analysis techniques, aligned with international standards, has made it possible to focus maintenance efforts on the most critical equipment and in the failure modes that have had the greatest impact on the performance of SAG mills, so much so that the action plans proposed and implemented for the fall of trommel meshes aimed to increase plant availability by 0.58%.

Finally, the failure management strategies for SAG mills were improved by updating procedures, standardizing spare parts, training technical personnel and the re-evaluation of the reliability of the components of trommel meshes. These actions are intended to mitigate failures and achieve projected productivity rates, establishing a benchmark for other mining units with similar problems and thus contributing to maintaining more efficient mining.

Keywords: SAG mills, availability, preventive maintenance, failure analysis, trommel meshes, mining, ACR, Pareto, Jack Knife, operational efficiency.

INDICE

Resumen	iii
Abstract.....	iv
Introducción	xiii
CAPÍTULO I. Planteamiento de La Realidad Problemática	1
1.1 Antecedentes Investigativos	1
1.2 Descripción de la realidad problemática	2
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
1.4 Justificación e importancia.....	6
CAPÍTULO II. Marco teórico.....	7
2.1 Molino SAG	7
2.1.1 Descripción general.....	7
2.1.2 Principio de funcionamiento	7
2.1.3 Sistemas y configuración del circuito de molienda	9
2.2 Mantenimiento	10
2.2.1 Definición	10
2.2.2 Tipos de mantenimiento	11
2.2.3 Indicadores de mantenimiento	13
2.2.4 Confiabilidad operacional en la gestión de activos	15

2.3	Fallas en el mantenimiento industrial	17
2.3.1	Clasificación	17
2.4	Taxonomía de equipos	19
2.5	Diagramas EPS y de flujo	21
2.6	Análisis de criticidad	22
2.7	Jerarquización de fallas	26
2.7.1	Diagrama de Pareto	26
2.7.2	Diagrama de Jack Knife	27
2.8	Herramientas de diagnóstico	28
2.8.1	Análisis de causa raíz	28
2.8.2	Árbol de fallas	29
2.9	Disponibilidad y utilización de planta	30
2.9.1	Factores que afectan la disponibilidad.....	30
2.9.2	Impacto de tiempos improductivos.	30
2.9.3	Estrategias de mejora.	30
CAPÍTULO III. Metodología de la investigación.....		31
3.1	Tipo, Enfoque y Diseño de la Investigación	31
3.1.1	Método de la investigación	31
3.1.2	Tipo de la investigación.....	31
3.1.3	Enfoque de la investigación.....	31
3.1.4	Diseño de la investigación.....	31

3.2	Variables y Operacionalización.....	32
3.2.1	Variable Independiente	32
3.2.2	Variable Dependiente.....	32
3.3	Población, Muestra y Muestreo	32
3.3.1	Población	32
3.3.2	Muestra	32
3.3.3	Muestreo	32
3.4	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	33
3.4.1	Técnicas de recolección de datos	33
3.4.2	Instrumentos de recolección de datos	33
3.5	Procedimiento.....	33
3.5.1	Establecimiento del contexto operacional.....	34
3.5.2	Jerarquización de activos y modos de falla	35
3.5.3	Análisis de fallas	35
3.5.4	Propuesta de soluciones	35
3.6	Aspectos éticos	36
3.6.1	Confidencialidad y manejo de datos.....	36
3.6.2	Consentimiento informado.....	36
3.6.3	Cumplimiento normativo.....	36
3.6.4	Responsabilidad social.....	36

CAPÍTULO IV. Análisis de resultados	37
4.1 Contexto operacional.....	37
4.1.1 Taxonomía de los equipos	37
4.1.2 Contexto operativo actual.....	38
4.1.3 Diagrama EPS	40
4.1.4 Funciones de los molinos SAG	43
4.1.5 Funciones de los componentes.....	44
4.2 Jerarquización de activos y modos de falla.....	46
4.2.1 Análisis de criticidad.....	46
4.2.2 Diagrama de Pareto y Jack Knife	52
4.3 Análisis causa - raíz.....	62
4.3.1 Árbol lógico de fallas	63
4.4 Planes de acción	67
4.5 Disponibilidad	70
CAPÍTULO V. Discusión de resultados	73
5.1 Definición de funciones.....	73
5.2 Jerarquización de activos y modos de falla.....	74
5.3 Análisis causa – raíz.....	74
5.4 Planes de acción	76
5.5 Disponibilidad	77
Conclusiones	78

Recomendaciones	80
Bibliografía.....	82
ANEXOS.....	85

Lista de tablas

Tabla 1 Datos generales del molino SAG	39
Tabla 2 Funciones de los molinos.....	44
Tabla 3 Funciones de los componentes	44
Tabla 4 Pesos asignados a los criterios de evaluación	46
Tabla 5 Resultados de evaluación de criticidad de equipos del área de molienda	48
Tabla 6 Resultados de evaluación de criticidad de componentes de los molinos.....	49
Tabla 7 Frecuencia y tiempos por modo de falla año 2022	52
Tabla 8 Frecuencia y tiempos por modo de falla año 2023	56
Tabla 9 Frecuencia y tiempos por modo de falla año 2024	59
Tabla 10 Resumen de fallas críticas y agudas en los molinos SAG, 2022- 2024	62
Tabla 11 Evidencias de las fallas.....	65
Tabla 12 Planes de acción – caída de mallas de trommel	67
Tabla 13 Impacto en la disponibilidad por modos de falla.....	70

Lista de figuras

Figura 1	Proyección de oferta y demanda del Cu	3
Figura 2	Indicador de desempeño - Año 2022	5
Figura 3	Indicador de desempeño - Año 2023	5
Figura 4	Ejemplo diagrama de Pareto.....	26
Figura 5	Ejemplo diagrama de Jack Knife.....	28
Figura 6	Metodología de Análisis de fallas.....	34
Figura 7	Jerarquía de equipos establecida en el SAP	37
Figura 8	Clasificación taxonómica de los equipos de planta	38
Figura 9	Diagrama de flujo de los molinos SAG.....	40
Figura 10	Diagrama de bloques de molienda.....	42
Figura 11	Diagrama EPS de molinos	43
Figura 12	Evaluación de criticidad de los activos físicos	47
Figura 13	Pareto de duración por modo de falla año 2022.....	53
Figura 14	Jack Knife por modo de falla 2022	54
Figura 15	Pareto de duración por modo de falla año 2023.....	57
Figura 16	Jack Knife por modo de falla 2023	58
Figura 17	Pareto de duración por modo de falla año 2024.....	60
Figura 18	Jack Knife por modo de falla 2024	61
Figura 19	Caja principal del árbol lógico de fallas de los molinos SAG	63
Figura 20	Línea de tiempo de caída de mallas periodo 2022-2024.....	64
Figura 21	Árbol lógico de fallas – Caída de mallas de trommel.....	66
Figura 22	Cálculo de esfuerzos de los pines – caída de mallas	69
Figura 23	Disponibilidad y Utilización de Planta 2022	71

Figura 24	Disponibilidad y Utilización de Planta 2023	71
Figura 25	Disponibilidad y Utilización de Planta 2024.....	72

Introducción

El sector minero actual enfrenta el reto de mantener altos niveles de competitividad y eficiencia en un entorno donde los márgenes económicos y las demandas operativas son cada vez más estrictos bajo la normativa del país. En este contexto, los molinos SAG desarrollan un rol fundamental, debido a que son máquinas de procesamiento de mineral de gran volumen, por lo que su correcta práctica no solo garantiza una buena producción, sino que también impacta en los costos y continuidad de las operaciones de la unidad minera Constancia.

Con ello, esta investigación se basa en el incremento significativo de detenciones imprevistas relacionadas con los componentes de estos molinos, representando un problema crítico al disminuir de forma continua la productividad e incrementar los costos de mantenimiento por la compra de repuestos y recursos no planeados, afectando a su disponibilidad, por lo que este fenómeno subraya la importancia de implementar estrategias más eficientes para abordar las fallas recurrentes y los factores que las originan.

Para trabajar este problema, se utilizarán herramientas como el análisis de Pareto, la técnica de Jack Knife y la metodología de Análisis de Causa Raíz; debido a que permiten identificar con facilidad patrones de falla para así poderlos comprender y evaluar su impacto en los indicadores de desempeño que consideraremos como la confiabilidad y la disponibilidad del sistema. Ya con esto, se propondrán estrategias de mejora para disminuir las incidencias y paradas de planta generadas en la unidad y así además prolongar la vida útil de los equipos.

Del mismo modo, los resultados esperados permitirán fortalecer la sostenibilidad económica de las operaciones y ofrecer un marco de referencia para otras unidades mineras concentradoras que enfrenten problemas similares, transformando una minería más eficiente, innovadora y alineada a los estándares altos de operatividad.

CAPÍTULO I. Planteamiento de La Realidad Problemática

1.1 Antecedentes Investigativos

Cancino (2022), centra su investigación en análisis de fallas de la chancadora cónica luego de establecer como equipo más crítico de la planta de agregados en una cantera de la ciudad de Lima. Aborda la problemática de baja disponibilidad del equipo y las consiguientes pérdidas de producción por un monto de hasta 320 659. 78 USD registrados en el año 2017. Aplica la metodología FMEA y Pareto para jerarquizar el impacto de los modos de fallas identificados, y utiliza el árbol lógico de fallas para determinar las causas de raíces físicas, humanas y latentes del modo de falla crítico. El componente objeto de análisis es el cojinete semiesférico para el que se propuso dos alternativas basadas en costo-beneficio, indicador ROI, propuestas orientadas a mejorar el componente y a realizar inspecciones periódicas, obteniendo en una de las propuestas un retorno de 151%, siendo está propuesta la indicada para incrementar la productividad y rentabilidad de la planta de agregados.

Zavala (2022), en su trabajo de investigación realiza el análisis de fallas de los componentes críticos de una flota de jumbos perforadores que trabajan en una mina subterránea, con la finalidad de desarrollar estrategias de mantenimiento preventivo y mejorar los indicadores tales como, confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Clasifica las fallas a través del FMEA y jerarquiza las de mayor impacto a través del Jack-knife. A las fallas críticas identificadas le realiza un análisis de causa raíz y así determinar las mejores estrategias para controlar el efecto de las fallas. Los resultados obtenidos demuestran un incremento en los KPI's, la disponibilidad mejoró en un 2.4%, asimismo, el MTTR mejoró en 1.04 horas promedio; el MTBF mejoró en 1.55 horas lo cual implica que la flota de equipos en promedio trabaja más tiempo antes de presentar una falla, el MTBS mejoró en 4.01 de modo que el tiempo entre paradas tanto programadas como no programadas aumentó.

Viña (2019), en su trabajo de tesis presentado, desarrolla el análisis de fallas a una flota de palas electromecánicas de la marca CAT, modelo 7495HR, en la mina Antapacay, estos

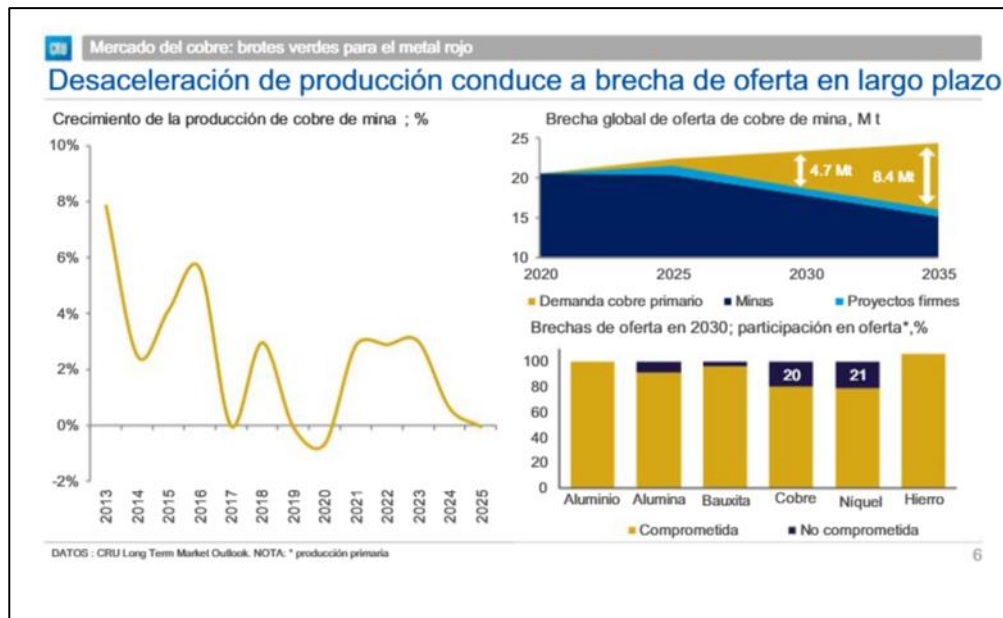
equipos son considerados de alta criticidad dentro de la operación debido a la gran capacidad de carguío de mineral. Aborda el problema de la baja disponibilidad y elevado porcentaje (mayor a 50%) de trabajos correctivos presentados en la flota de palas durante los años 2016 y 2017. Emplea la metodología de Jack knife para determinar las fallas críticas dando como resultado 3 componentes de las palas que tiene mayor incidencia en cuanto a los KPI's, a estos componentes los evalúa a través de ACR, árbol lógico de fallas, y plantea acciones para contralar estos modos de fallas y además mejorar la estrategia de mantenimiento preventivo.

1.2 Descripción de la realidad problemática

La industria minera presenta grandes desafíos y oportunidades de desarrollo en la actualidad, por un lado está la creciente demanda de cobre a nivel mundial, en este aspecto Hemlich (2021) señala que el porcentaje de crecimiento de la demanda de cobre en los próximos años (debido a la transición energética y tecnológica) será mayor al crecimiento de la oferta (Proyectos mineros nuevos), tal es así que para el año 2030 se tendrá un déficit en la producción de 4.7 Mt; por otro lado, está el incremento de los precios del concentrado que se está dando desde el 2021 alcanzado máximos históricos de 4.8 US\$/libra este año, con la proyección de que esta tendencia al alza continúe los próximos años influenciados en gran medida por la demanda y oferta, generando grandes expectativas para los productores e inversionistas mineros.

Figura 1

Proyección de oferta y demanda del Cu



Nota. Hemlich. (2021). Conferencia magistral ProEXplo.

En los últimos 10 años, la producción del cobre en el Perú se ha duplicado pasando de 1.38 Millones de TMF en el 2014 hasta los 2.76 millones TMF el año 2023, capacidad que representa el 12.7% de la producción mundial actualmente. La participación de la empresa Hudbay, con 131 691 TMF en al año 2023, represento el 4.8% de la producción nacional. Es en este escenario que la unidad minera constancia, enfrenta grandes desafíos para los próximos años, siendo un yacimiento de baja ley, promedio de 0.36% ley de Cu, una de las alternativas que tiene la empresa para continuar siendo competitivo, será mejorar la Capacidad y Eficiencia de su proceso, en consecuencia, la empresa, se ha proyectado incrementar el volumen de procesamiento de la planta para los próximos años, este año se va procesar 31 mtpa, para el 2025 se proyectó 32 mtpa hasta llegar a 34 mtpa el 2027, esto implica incrementar la capacidad de la planta (repotenciar y aumentar equipos), así como como lograr los índices de desempeño (indicadores de producción) proyectados.

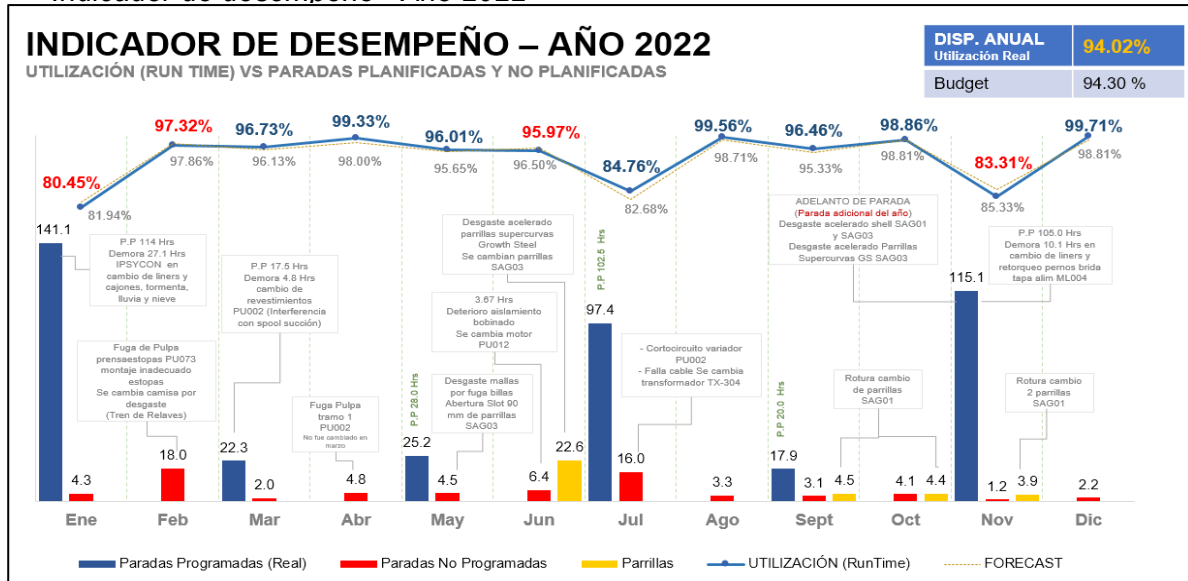
Revisando el desempeño de la planta durante el periodo 2002-2004, respecto a los indicadores de disponibilidad y utilización directamente relacionados, el año 2022 se tuvo en desviación negativa de 0,28%, que se traduce en dejar de producir 25.4h, y el año 2023, un déficit de 0.76%, que son 66. 6 h menos, que en términos monetarios significa pérdidas de 100 000. 00 \$/h. Siendo más específicos de un total 33 meses analizados, no se logró la disponibilidad proyectada en 14 meses, esto debido al incremento de los eventos de paradas (no programados), con mayores tiempos asociados a estos, en los diferentes equipos críticos de la planta, entre ellos los molinos SAG, como se puede ver en las figuras 2 y 3.

En la gestión de los activos de la planta concentradora, en particular de los molinos SAG, se tiene implementado el mantenimiento basado en la confiabilidad, se tiene bien desarrollado el mantenimiento planificado (inspecciones, paradas programadas, monitoreo de condición), que en términos generales se obtiene mejores resultados que otras unidades mineras, a pesar de ello durante el periodo 2022-2024, se está evidenciando del registro de fallas un incremento del impacto de estos eventos, que ya se tenían identificados (que habían ocurrido en años anteriores) pero que últimamente estos modos de falla se están tornando repetitivos y críticos.

Es en este contexto que surge la necesidad de realizar el análisis de las fallas de los molinos SAG, para encontrar las causas y establecer los planes de acción para reducir estos modos de falla que no se están siendo controlados y con ello obtener mejoras en la disponibilidad y productividad de la planta.

Figura 2

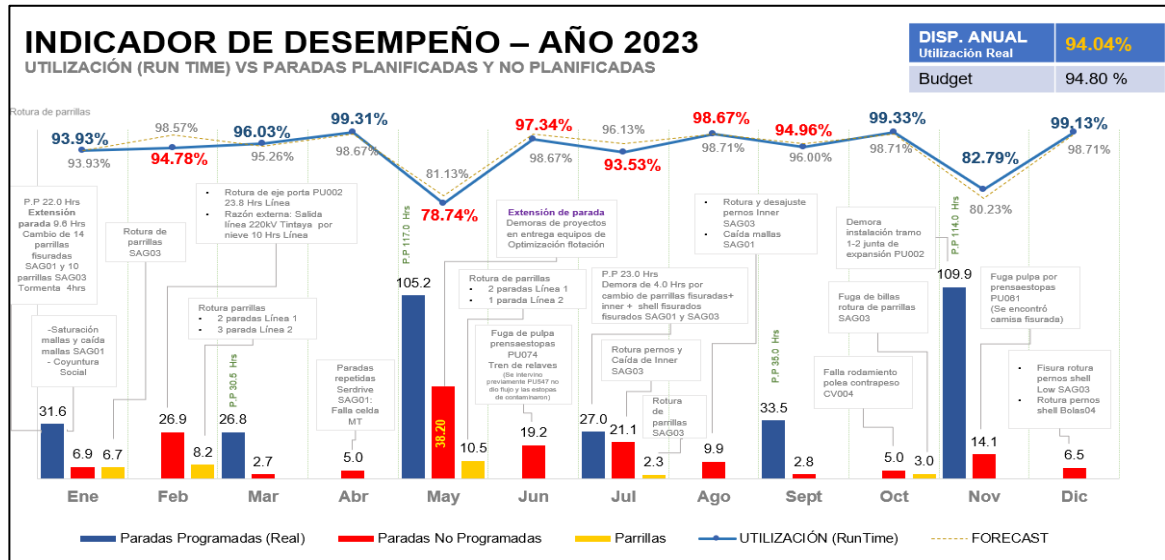
Indicador de desempeño - Año 2022



Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Figura 3

Indicador de desempeño - Año 2023



Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar el análisis de causa raíz de las fallas de los molinos SAG para mejorar la disponibilidad la unidad minera constancia a través de planes de acción específicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Definir el contexto operacional con el fin de establecer las funciones de los molinos SAG a través de la recopilación de información del proceso.
- b) Jerarquizar los activos y los modos de fallas para establecer el nivel de prioridad de los activos mediante el análisis de criticidad y los diagramas de Jack Knife y Pareto.
- c) Realizar el análisis causa raíz a las fallas críticas para encontrar los factores causales utilizando la herramienta de árbol lógico.
- d) Implementar planes de acción para mejorar la disponibilidad.

1.4 Justificación e importancia.

Los molinos SAG son considerados como los equipos más críticos dentro del proceso de molienda, incluso se puede decir de toda la planta, y va a depender del rendimiento de estos equipos el desempeño global de toda la planta, es por ello de gran importancia identificar, controlar los malos actores y reducir las pérdidas que se están dando en estos activos.

El propósito del estudio será establecer una metodología de análisis de fallas en los molinos de SAG en el periodo 2022-2024, aplicando las herramientas de la confiabilidad y toma de decisiones, como son el análisis de criticidad, análisis de causa raíz y los diagramas de Pareto y Jack Knife, para luego establecer planes de acción que ayuden a mejorar el desempeño de los molinos, los índices de disponibilidad y productividad de la planta.

El presente estudio brinda una metodología de análisis de fallas, estructurada de forma ordenada, alineadas a las normas de mantenimiento (norma ISO 14224, EN 62740, etc.), que será aplicada y aprovechada en primer lugar por la unidad minera constancia, y que a su vez pueda ser extensible para realizar otros estudios, en otros equipos y otras plantas.

CAPÍTULO II. Marco teórico

2.1 Molino SAG

2.1.1 Descripción general

El molino semi-autógeno (SAG), es un componente fundamental en el proceso de conminución, el cual está diseñado para disminuir el tamaño de las partículas minerales mediante impactos. La tarea principal es procesar el material que proviene del chancador primario y transferirlo al cajón, desde donde se transporta a la batería de hidrociclones primarios para su posterior separación.

Este procedimiento de trituración se realiza en un entorno húmedo, donde se mezclan partículas de mineral, agua y sustancias químicas específicas. Por otro lado, la regulación del nivel de agua en la pulpa se lleva a cabo en función del peso del mineral que se introduce desde los depósitos, con la finalidad de mantener una densidad adecuada en el molino.

El molino SAG emplea una cantidad moderada de esferas de acero, la cual es menor en comparación con la requerida por un molino de bolas, lo que le otorga su naturaleza semi-autógena. Estas esferas tienen un papel importante en la mejora de la eficiencia del proceso al facilitar la molienda del mineral, además la fragmentación se consigue principalmente a través del movimiento de volteo en el interior del molino, donde el mineral queda atrapado entre el medio de molienda y es sometido a fuerzas de impacto y abrasión.

Por último, la rotación del molino produce la acción requerida para elevar el material, mejorando el proceso de molienda y garantizando un rendimiento eficaz del equipo (HUDBAY, 2021).

2.1.2 Principio de funcionamiento

El molino SAG funciona con una carga que incluye mineral proveniente de la trituración primaria, bolas de acero para moler, mineral recirculado y agua de proceso. Esta carga representa un máximo del 25% del volumen total del molino, de los cuales las esferas utilizadas

para la molienda constituyen alrededor del 15%, estando dentro del límite máximo establecido en un 18%. El nivel de agua se ajusta de acuerdo con el peso del mineral introducido, asegurando la densidad adecuada de la mezcla en el interior.

Durante el proceso, la rotación del molino, impulsada por el motor y sostenida por los cojinetes, produce una acción de descenso brusco del material. Este desplazamiento es llevado a cabo por dispositivos elevadores ubicados en el interior del cilindro, los cuales elevan la carga antes de soltarla, mejorando así el procedimiento de molienda. Sin la presencia de estos dispositivos de elevación o en caso de que los revestimientos estén desgastados, la carga puede deslizarse, lo cual disminuye la eficiencia y acelera el desgaste abrasivo, lo que hace indispensable llevar a cabo un mantenimiento regular.

La molienda es el resultado de la interacción de impactos, golpes y abrasión entre el mineral, las esferas y las partículas en movimiento. La carga se eleva hasta alcanzar dos tercios del arco de rotación antes de descender, creando un efecto de cascada que disminuye gradualmente el tamaño del material, el cual es finalmente descargado por el extremo correspondiente.

El molino está funcionando a una velocidad que supera el 80% de su velocidad crítica (NCR), que es el valor que determina la velocidad en la cual el material se adhiere a las paredes del molino debido a la fuerza centrífuga, impidiendo el efecto de cascada. Mantener una velocidad apropiada y un nivel óptimo de carga son factores fundamentales para preservar los revestimientos contra impactos directos y garantizar la eficacia del proceso.

Adicionalmente, el funcionamiento del molino requiere la modificación de la velocidad de rotación con el fin de regular el fenómeno de cascada, garantizando que la capa de mineral absorba los impactos y resguarde los revestimientos. Un correcto manejo de estas variables asegura la continuidad de la operación y la longevidad de los elementos internos del molino.

2.1.3 Sistemas y configuración del circuito de molienda

2.1.3.1 Sistema de accionamiento eléctrico. Los dispositivos de accionamiento eléctrico en los molinos están compuestos de equipos mecánicos que dependen de un sistema motriz compuesto por uno o dos motores dependiendo de su accionamiento. Dicha selección de motores se basa principalmente en el grado de potencia requerida y en la capacidad de adaptar la velocidad, siendo para el caso de los molinos SAG una variable no primordial debido a que opera a una velocidad invariable ya que esto no perjudica su eficiencia y rendimiento del proceso (Armas, 2023).

2.1.3.2 Sistema de accionamiento mecánico. Los dispositivos de accionamiento mecánico hacen ilusión a los elementos responsables de transmitir la energía requerida del motor hacia el molino, garantizando que esta energía se transforme en movimiento, lo que lo hace esencial para la operación del molino; con ello, es necesario que sea diseñado en paralelo con las características del mineral a procesar bajo las exigencias de la planta. Cabe resaltar que su estructura puede cambiar en función del tipo de molino y del trabajo a realizar (Armas, 2023).

2.1.3.3 Circuito de molienda tipo SAG. Estos circuitos se caracterizan por poseer múltiples etapas para la reducción del tamaño del mineral extraído, usando molinos de barras, bolas y en ciertos casos autógenos. Resulta imposible llevar a cabo la molienda del mineral en una única etapa, dado que ello incrementaría el consumo energético. Según Armas (2023), dependiendo del circuito se tiene:

- Circuito de apertura: Aquí el mineral se mueve por los molinos sin que exista una fase de clasificación en forma paralela.
- Circuito cerrado: El molino se encuentra unido a un clasificador que remite el material grueso al molino, mientras que el material más fino se mueve hacia la siguiente etapa, siendo eficaz para evitar el sobredimensionamiento de material, disminuyendo el consumo energético y optimizando los procesos.

2.1.3.4 Factores de dimensionamiento.

Los molinos SAG se encuentran influenciados por varios factores que determinan el rendimiento de la planta, siendo los siguientes:

- Granulometría de abastecimiento: ingreso del mineral por alimentadores en diversas cantidades y formas.
- Velocidad (RPM): regulada por un variador en el motor, determinada por la dureza del mineral.
- Motivo de consumo: en caso de que el tonelaje sea insuficiente o sobrepase las cantidades, aumentando la demanda de potencia.
- Agua de consumo: regula las cantidades de agua que es combinada con el mineral, creando proporciones permitidas.
- Dureza de la roca: teniendo un impacto en su resistencia a la fractura, modificando la velocidad del motor.
- Presión en las pausas: identificando cuando el molino se sobrecarga, para así regular la densidad de la pulpa.
- Carga de las bolas: con el fin de realizar una molienda eficaz con dimensionamientos entre 5" y 6", manteniendo un buen desempeño.

2.2 Mantenimiento

2.2.1 Definición

El mantenimiento se define como el conjunto de acciones técnicas y organizativas llevadas a cabo para conservar o reparar un equipo, sistema o infraestructura hasta que pueda cumplir con su función necesaria. El objetivo es aumentar al máximo la confiabilidad de los activos y su disponibilidad, disminuyendo al mínimo las interrupciones que no están planificadas y optimizando el costo total de la operación (Olarte et al., 2010).

En la industria minera, el mantenimiento es de vital importancia debido a las condiciones extremas a las que se exponen los equipos, como los molinos SAG, que funcionan en entornos de alta exigencia y tensión mecánica. Su propósito principal en esta ocasión es asegurar la seguridad, eficiencia operativa y la durabilidad de los equipos, reduciendo los riesgos de averías que puedan impactar los costos y la producción.

Se emplean diferentes métodos de conservación, como el mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y centrado en la confiabilidad, en función de la importancia y la naturaleza del equipo. La selección de la estrategia apropiada está condicionada por varios elementos, tales como las particularidades del equipo, las consecuencias de los fallos, los gastos relacionados y la disponibilidad de los recursos.

2.2.2 Tipos de mantenimiento

El mantenimiento se categoriza en diferentes tipos dependiendo de la estrategia empleada para garantizar la operatividad constante de los equipos. AENOR (2018), indica los tipos de mantenimiento más utilizados en el sector minero:

2.2.2.1 Mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo consiste en llevar a cabo intervenciones programadas de manera regular, sin importar si el equipo tiene averías o no. El objetivo principal es prevenir el deterioro anticipado de los equipos, disminuyendo la posibilidad de fallos imprevistos. Por lo que este tipo de mantenimiento se centra en la inspección, aplicación de lubricantes, sustitución y ajustes de elementos, que debido a su tiempo de trabajo comienzan a deteriorarse.

En la industria minera, se lleva a cabo este tipo de mantenimiento siguiendo el ciclo de vida de los instrumentos y equipos para poder garantizar a largo plazo su confiabilidad y durabilidad, especialmente en fallas críticas recurrentes.

2.2.2.2 Mantenimiento correctivo. El mantenimiento correctivo se refiere a las acciones tomadas para corregir averías o fallas en un sistema o equipo, con la finalidad de poder restaurar en el menor tiempo posible su funcionamiento en la planta, lo que involucra la sustitución de las piezas dañadas. Aunque de forma común se percibe como un enfoque reactivo, resulta indispensable en situaciones donde las fallas son inevitables debido a las condiciones extremas de trabajo y la carga operativa.

2.2.2.3 Mantenimiento predictivo. El mantenimiento predictivo se fundamenta en el uso de tecnologías avanzadas de supervisión y análisis de datos en tiempo real, con el objetivo de poder anticipar posibles fallos antes de su ocurrencia mediante la constante evaluación de variables como la vibración, temperatura, la presión, nivel de calor, entre otros, es factible detectar situaciones irregulares que podrían sugerir una proximidad del deterioro de las piezas. Del mismo modo, esta metodología permite actuar de acuerdo con los tiempos de mantenimiento, reduciendo gastos superfluos.

2.2.2.4 Mantenimiento proactivo. El enfoque del mantenimiento proactivo consiste en detectar y solucionar las causas principales de los fallos, con la finalidad de prevenir su recurrencia en operaciones futuras en equipos y procesos de la minería. La buena práctica de este procedimiento permite incrementar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, ya que se enfoca en abordar la causa raíz de los problemas en lugar de solo atender los síntomas. Para el caso de los molinos SAG, este mantenimiento implica mejorar los diseños de las máquinas y con ello reajustar los procesos de operación.

2.2.2.5 Mantenimiento planificado. El mantenimiento planificado implica la organización y programación de forma anticipada siguiendo un calendario o programa preestablecido, lo que significa que este procedimiento se basa en la correcta gestión de los recursos disponibles, evitando los periodos de inactividad por la mala práctica logística de la empresa. En el sector de la minería, garantiza que las tareas de mantenimiento se lleven a cabo de forma coordinada con la producción para aumentar el rendimiento en un ambiente laboral preparado.

2.2.3 Indicadores de mantenimiento

Los indicadores de mantenimiento son herramientas esenciales para medir la eficiencia de las labores de mantenimiento y de fiabilidad de los equipos. Con ello, a continuación, se detallan los indicadores principales empleados en el sector minero y posteriormente empleados para los molinos SAG. García (2003), nos indica los siguientes indicadores:

2.2.3.1 MTTR (Tiempo Medio de Reparación). Es un indicador fundamental que cuantifica la duración promedio necesaria para arreglar un componente o equipo tras una falla o avería, debido a que abarca el tiempo requerido para realizar el diagnostico, reparación y restauración del equipo a sus condiciones originales. Con ello, un tiempo de reparación bajo indica una eficiente capacidad para restaurar los equipos rápidamente, lo cual es importante para reducir el tiempo de inactividad y poder mantener la producción de los minerales.

En lo que respecta a los molinos SAG, el MTTR muestra de forma directa la suficiente capacidad que tiene el personal de mantenimiento para trabajar ante una parada critica de planta. Se realiza el calcula con la **Ecuación [1]**.

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo de eventos de falla } (T_{EF})}{\text{Número de eventos de falla } (N_{EF})} \quad [1]$$

2.2.3.2 MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas). Este indicador calcula el tiempo medio entre dos fallos consecutivos de un componente o equipo, reflejando la fiabilidad de forma directa, lo que quiere decir que un valor elevado indica que la máquina presenta una frecuencia baja de fallas logrando una mayor disponibilidad operativa.

Para el caso de los molinos SAG, es fundamental contar con un MTBF alto para que garantice la continuidad en la planta y esto se debe a que este examen posibilita identificar pautas de fallos y concentración de esfuerzos. Se realiza el cálculo con la **Ecuación [2]**.

MTBF

$$= \frac{\text{Tiempo calendario } (T_{CAL}) - \text{Tiempo de eventos de falla } (T_{EF})}{\text{Número de eventos de falla } (N_{EF})} \quad [2]$$

2.2.3.3 Disponibilidad operativa. La disponibilidad operativa se define como el porcentaje de tiempo en el cual un equipo o sistema se encuentra disponible para trabajar en condiciones óptimas, en comparación con el tiempo total de operación ya programado. Este indicador considera tanto las averías como los tiempos de mantenimiento mostrando la eficiencia operativa de los equipos y en el caso de ser un valor alto se encontraría en un estado bueno para operar la mayor parte del tiempo, generando una mayor rentabilidad. Se realiza el cálculo con la **Ecuación [3]**.

$$\text{Disponibilidad Operativa} = \frac{\text{Tiempo de Operación}}{\text{Tiempo Total Programado}} \times 100 \quad [3]$$

2.2.3.4 Disponibilidad mecánica. La disponibilidad mecánica es un parámetro que guarda similitud con la disponibilidad operativa, pero que se centra de forma específica en los aspectos mecánicos de los equipos, calculando la proporción de tiempo durante un equipo está funcionando, sin tener en cuenta los periodos no productivos generados por los fallos mecánicos o interrupciones.

Para el caso de los molinos SAG serviría para analizar los cojinetes, mecanismo de transmisión y ejes, que son las partes más críticas de la máquina y por quienes se da el movimiento general. Se realiza el cálculo con la **Ecuación [4]**.

$$\text{Disponibilidad Mecánica} = \frac{\text{Tiempo de Operación Mecánica}}{\text{Tiempo Total Programado}} \times 100 \quad [4]$$

2.2.3.5 OEE (Eficiencia general de los equipos). Es una métrica completa que estudia la eficiencia global de un equipo, considerando la disponibilidad operativa, calidad y rendimiento, por lo que ofrece una perspectiva integral de los componentes en cuanto a su funcionamiento. Además, facilita la detección de problemas mecánicos y obstrucciones en los procesos de fabricación. Se realiza el cálculo con la **Ecuación [5]**.

$$\text{OEE} = \left(\frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Total Programado}} \right) \times \left(\frac{\text{Rendimiento}}{\text{Rendimiento Nominal}} \right) \times \left(\frac{\text{Producción Buena}}{\text{Producción Total}} \right) \quad [5]$$

2.2.4 Confiabilidad operacional en la gestión de activos

La fiabilidad operativa en la administración de activos es un aspecto fundamental en la industria minera, ya que garantiza el funcionamiento constante y eficaz de los equipos e instalaciones críticas. Este concepto engloba la capacidad de los sistemas para funcionar sin

interrupciones inesperadas, mejorando su durabilidad y maximizando la rentabilidad de la inversión. En el ámbito de la minería, donde las condiciones de trabajo son muy exigentes, es fundamental asegurar la fiabilidad con el fin de reducir al mínimo los períodos de inactividad y los gastos relacionados con averías imprevistas.

La administración de activos en la industria minera implica la incorporación de tácticas de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo. El enfoque de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) brinda la posibilidad de establecer prioridades en las acciones dirigidas a los activos de mayor importancia, mientras que el Mantenimiento Basado en Condición (CBM) emplea información actualizada para prever posibles fallos y planificar intervenciones de manera oportuna. Estas estrategias se complementan con tecnologías de vanguardia, como sensores sofisticados y análisis de datos, que permiten la supervisión continua de aspectos fundamentales como vibración, temperatura y desgaste.

Además de los elementos técnicos, la fiabilidad operativa abarca aspectos relacionados con el factor humano y la estructura organizativa. Dentro del ámbito minero, la formación del personal responsable de la gestión de mantenimiento es fundamental para asegurar la correcta implementación de las estrategias previamente establecidas. Es igualmente relevante establecer sistemas de administración que estén en concordancia con normativas internacionales como la ISO 55000. Esta norma fomenta una gestión eficaz de los bienes físicos de acuerdo con los objetivos estratégicos de la organización.

La evaluación de los indicadores de rendimiento es esencial para analizar la fiabilidad en las operaciones. Indicadores como el Tiempo Promedio Entre Fallos (MTBF), el Tiempo Promedio de Reparación (MTTR) y la Disponibilidad Operativa son útiles para detectar áreas de mejora y modificar las estrategias con el fin de incrementar la eficacia. En el sector minero, las interrupciones no planificadas pueden afectar considerablemente la producción, por lo que estos indicadores son fundamentales para preservar la competitividad.

En resumen, la confiabilidad operacional en la administración de activos mineros tiene como objetivo no solo disminuir las fallas y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, sino también asegurar la seguridad de las operaciones y la sostenibilidad a largo plazo. La aplicación adecuada de este sistema contribuye a mejorar la eficiencia, rentabilidad y capacidad de adaptación de una operación minera ante los desafíos específicos de la industria (Gasca et al., 2020).

2.3 Fallas en el mantenimiento industrial

En el contexto del mantenimiento industrial, una falla se define como la incapacidad de un sistema, equipo o componente para ejercer su función prevista de forma segura y eficiente, incluyendo desde una reducción de su rendimiento hasta un mal funcionamiento parcial o total que requiera una intervención técnica inmediata, ya sea por medio de reparaciones, ajustes o el reemplazo de piezas. Estas fallas pueden aparecer por diversos factores, como el desgaste de los materiales, errores de operación, condiciones ambientales adversas o por falta de mantenimiento adecuado, por lo que su impacto resulta ser significativo generando paradas no planificadas, pérdidas de productividad y con ello costos adicionales. Es por estas razones que es necesario identificar y abordar las fallas para garantizar la confiabilidad operativa de los equipos, prolongando su vida útil y reduciendo los tiempos de inactividad (ISO, 2016).

Además, la implementación de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo desempeñan un papel fundamental para anticiparse a estas fallas, con el objetivo de lograr un funcionamiento continuo de las máquinas en las plantas de producción.

2.3.1 Clasificación

Se clasifican de acuerdo con su frecuencia e impacto de las fallas, siendo útiles para priorizar acciones correctivas y estrategias de mantenimiento.

2.3.1.1 Fallas repetitivas. Se presentan cuando un equipo sufre averías constantes, las cuales interrumpen la continuidad operativa y generan consecuencias significativas. Por un lado, estas fallas ocasionan altos costos de mantenimiento y tiempos muertos, afectando la calidad del producto y aumentando los riesgos en las operaciones. Del mismo modo, se requiere un análisis exhaustivo para determinar si su causa es humana, del proceso o del material, ya que esto puede derivar a paradas imprevistas y reparaciones costosas (Ortiz, 2022).

2.3.1.2 Fallas frecuentes. Se producen repetidamente debido a las condiciones adversas o a las malas prácticas operativas, afectando la eficiencia y requiriendo una atención rápida para evitar paradas continuas, lo cual puede aumentar costos y reducir la vida útil de los equipos (Ortiz, 2022).

2.3.1.3 Fallas esporádicas o eventuales. Se producen cuando ocurre una desviación fuera del rango aceptable de operación, generalmente en valores por debajo de lo normal. Este tipo de fallas, aunque poco frecuentes y no relacionadas entre sí, afectan la estabilidad operativa de forma temporal; sin embargo, su eliminación suele restablecer las condiciones dentro de un rango aceptable. Por tanto, estas averías no suelen requerir intervenciones complejas, pero es importante monitorearlas para evitar recurrencias (Murillo, 2020).

2.3.1.4 Fallas críticas. Son eventos que afectan de manera directa la seguridad de los empleados, el medio ambiente, la producción, y que, en algunos casos, pueden resultar en grandes pérdidas económicas y de reputación para la empresa. Su diagnóstico y resolución son esenciales para mantener la operatividad de la planta, la seguridad del personal y la sostenibilidad del entorno de trabajo (Medina, 2016).

2.3.1.5 Fallas no críticas. Son defectos que no alteran significativamente la seguridad, el medio ambiente ni la producción. Aunque no son urgentes, pueden convertirse en problemas si no se abordan a tiempo, lo que podría llevar a un aumento en los costos operativos y de mantenimiento (Medina, 2016).

2.3.1.6 Fallas incipientes. Están en sus primeras etapas de desarrollo y sin afectar el funcionamiento general; sin embargo, pueden ser detectadas mediante el uso de tecnologías predictivas. Por lo que identificarlas rápido permite actuar con medidas preventivas, evitando daños mayores (Murillo, 2020).

2.3.1.7 Fallas latentes. Estos defectos no se manifiestan hasta que se dan las condiciones específicas que las activan. Cabe resaltar, que estas son difíciles de identificar sin un monitoreo adecuado, por lo que tiende a afectar el rendimiento operativo si no se corrigen a tiempo (Murillo, 2020).

2.4 Taxonomía de equipos

Conforme a la normativa ISO 14224, la taxonomía se conceptualiza como un procedimiento de clasificación sistemática que se agrupa en varias categorías genéricas, tomando en cuenta parámetros como su propósito de trabajo, localización y sus subdivisiones de equipos. Con frecuencia es referido como un árbol de máquinas y esto debido a su estructura y acceso a recursos.

Según SHEN (2024), indica que es necesario responder cuestiones cruciales en la gestión y el proceso de toma de decisiones ante las diversas situaciones presentadas, respondiendo a lo siguiente:

- ¿Qué activos se tienen?
- ¿Cuál es la condición actual del activo?
- ¿Dónde se encuentran?
- ¿Cuál es su valor económico?

- ¿Cuál es su vida útil?

En cuanto a su clasificación, no existe un orden generalizado, ya que frecuentemente varía de acuerdo con la estructura de trabajo de la empresa.

Ventajas de una estructura organizada

(SHEN, 2024), nos dice que mantener una taxonomía coherente brinda varios beneficios:

- La optimización en la administración de tareas: debido a que promueve la supervisión de tareas, la planificación y expedición de las labores; la codificación de repuestos.
- Fácil operatividad: esto ocurre porque facilita elaborar los informes de seguimiento y con ello la solicitud de repuestos.
- Buen soporte de mantenimiento: mantiene un óptimo análisis estadístico de las operaciones, problemas y reparaciones.
- Beneficios económicos: buenas prácticas en la aplicación de la normativa (NIC 16, IFRS, NIC 36)

Fuentes de información

Exige la recopilación de información de forma exhaustiva, siendo necesario tener:

- Planos de construcción y de diseño de equipos
- Manual del fabricante
- Listado de equipos y recursos
- Fotografías y videos de apoyo
- Entrevistas informales con el personal colaborativo

Un levantamiento integro de la maquinaria de la planta se logra mediante el uso de varias fuentes de información, considerando factores como la experiencia en averías o fallas ocurridas y la estandarización con otras plantas de trabajo para poder consolidar toda la información.

Codificación de activos

Para lograr identificar de forma rápida y única los activos de la empresa, es necesario implementar un sistema de codificación que sea compatible con el software de administración de mantenimiento. SHEN (2024), dice que se debe mantener:

- Sencillo de implementar
- Ajustable al tipo de mantenimiento
- Alineado a las directrices de la empresa

2.5 Diagramas EPS y de flujo

Los diagramas EPS y de flujo son herramientas visuales utilizados en disciplinas como la informática, la ingeniería y mantenimiento industrial, debido a su facilidad de representar los procesos de planta, identificar ciertos puntos críticos y poder optimizar el flujo de trabajo, para ello se incluyen imágenes, símbolos, dibujos o palabras clave para mejorar la descripción de forma lógica y estructura. Según Peña (2011), los diagramas permiten entender la secuencia de los hechos y operaciones dentro del sistema, de forma similar como los algoritmos.

Diagrama de Entrada – Proceso – Salida (EPS).

Los diagramas EPS se emplean para representar las tres fases principales de un proceso:

- Entrada: Los datos iniciales para ejecutar el proceso.
- Proceso: Las operaciones realizadas para darle solución al problema o transformar los datos.
- Salida: Los resultados obtenidos tras terminar el proceso.

Cabe resaltar que estos diagramas se organizan modularmente, facilitando así la identificación del orden lógico de las operaciones y con ello su ejecución. Incluyendo:

- Entrada/ Salida: Indicando los datos de entrada y los resultados.
- Proceso: Indica las operaciones llevadas a cabo para lograr el resultado esperado.

- Líneas de flujo: Indican la ejecución de las operaciones, manteniendo un flujo secuencial y lógico.

Diagramas de Flujo.

Los diagramas de flujo son representaciones gráficas del flujo de operaciones en un sistema de trabajo, usando símbolos que permitan facilitar su interpretación. De la misma forma que los diagramas EPS, estos utilizan líneas de flujo para conectar símbolos para visualizar de forma clara el orden de trabajo. Sin embargo, también incluyen símbolos adicionales como conectores y decisiones lógicas, asíndolos más variables en su representación de los procesos.

Algunos aspectos para considerar son:

- Diseñar de arriba hacia abajo o de izquierda a derecha.
- Conectar los símbolos con líneas verticales y horizontales.
- Usar conectores para dividir diagramas grandes o para hacer módulos independientes.
- Crear un texto claro y conciso dentro de cada símbolo.

2.6 Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una herramienta fundamental para clasificar procesos, sistemas y equipos en plantas complejas, dividiéndolos en secciones manejables de manera controlada y sujeta a auditorías. Desde un punto de vista matemático, la criticidad se puede expresar como el resultado de multiplicar la frecuencia de eventos o fallos por sus respectivas consecuencias. Estos aspectos incluyen factores como la eficacia operativa, la adaptabilidad, los gastos de mantenimiento y los impactos en la seguridad y el entorno ambiental. Dentro de los criterios fundamentales para realizar un análisis de criticidad se encuentran la seguridad, el impacto ambiental, la producción, los costos operativos y de mantenimiento, el tiempo medio de reparación y la frecuencia de fallos.

Esta se compone de cuatro etapas esenciales: en primer lugar, se establecen los criterios que definen los parámetros de evaluación. Luego, se selecciona el método basado en principios de ingeniería y en la ponderación de factores. A continuación, se aplica el procedimiento siguiendo las directrices establecidas. Por último, se genera una lista jerarquizada que ordena los elementos según su impacto, de mayor a menor. Este modelo es especialmente útil cuando se requiere priorizar en sistemas complejos, administrar recursos limitados o aumentar el valor agregado y el impacto empresarial. Las áreas principales en las que se utilizan con mayor frecuencia son el mantenimiento, la inspección, la disponibilidad de la planta y la gestión de materiales (Huerta, 2000).

Etapas.

- **Definición de Criterios de Evaluación:** Durante esta fase se definen los estándares que se emplearán para valorar la importancia de los elementos. Estos criterios habitualmente abarcan aspectos como la seguridad, el impacto en el medio ambiente, la producción, los costos operativos y de mantenimiento, la frecuencia de fallos y el tiempo requerido para las reparaciones.
- **Elección del Método de Evaluación:** Después de establecer los criterios, se elige un método para evaluar cada uno de los sistemas, procesos o equipos. Este enfoque puede involucrar análisis cualitativos, análisis cuantitativos o una combinación de ambos. Además, es necesario establecer los criterios de ponderación y el método para calcular las puntuaciones de criticidad.
- **Implementación del Procedimiento de Evaluación:** Durante esta etapa, se realiza la evaluación concreta de cada componente utilizando el método seleccionado. Esto puede involucrar la recopilación de información histórica, la realización de inspecciones o el empleo de simulaciones para comprender cómo diversos factores inciden en el rendimiento de los equipos o procesos.

- **Clasificación de los Elementos Evaluados:** A partir de los resultados obtenidos en la evaluación, se procede a clasificar los elementos en distintas categorías de criticidad, tales como alta, media o baja. Este procedimiento facilita la clasificación de los elementos según su relevancia, lo que permite dar prioridad a la atención y asignación de recursos a aquellos que son más fundamentales.
- **Generación de la Lista Jerarquizada:** En esta fase final, se crea una lista organizada que presenta todos los elementos evaluados en orden de importancia, desde los más críticos hasta los menos críticos. Esta lista ofrece una fundamentación sólida para la toma de decisiones acerca de en qué áreas concentrar los esfuerzos de mantenimiento, inversión y mejora operativa.
- **Aplicación de Estrategias de Mejora:** Una vez que se cuenta con la lista clasificada por orden de importancia, se elaboran estrategias concretas para resolver los problemas identificados en los elementos críticos de mayor relevancia. Esto puede requerir la puesta en marcha de programas de mantenimiento preventivo, la realización de mejoras en el diseño de los equipos o la modificación de procesos operativos.

Criterios de evaluación. El análisis de criticidad es una metodología esencial para gestionar el mantenimiento industrial, debido a que permite distinguir los activos en función al riesgo e importancia asociados a posibles fallas. Por ello, es que este proceso implica evaluar varios criterios designándoles un peso específico según su transcendencia en la operación. Según los datos del sistema de mantenimiento y confiabilidad de la Unidad Minera Constanica (2024) se consideran los siguientes criterios:

- **Impacto a la Producción (IP):** Este criterio tendrá un peso 4, debido a que evalúa como la falla de un activo perjudica la capacidad de producción, por lo que una interrupción en equipos de alta criticidad puede resultar en pérdidas relevantes de

producción, afectando el cumplimiento y rentabilidad de la materia prima obtenida (Venegas, 2022).

- **Ocurrencia de Falla (OF):** Este criterio tendrá un peso 3, debido a que se refiere a la frecuencia en que un mecanismo se puede averiar. Una alta tasa de fallas aumenta los costos operativos y puede señalar la necesidad de estrategias de mantenimiento más eficaces (Venegas, 2022).
- **Costos de Mantenimiento (CM):** Este criterio tendrá un peso 2, debido a que considera los gastos asociados al mantenimiento de los activos, en donde se incluyen los repuestos, mano de obra y tiempo de paradas. Lo que quiere decir que los componentes que tengan altos costos requieren una gestión más cuidadosa para optimizar los recursos (Venegas, 2022).
- **Impacto en la Seguridad y Salud (ISS):** Este criterio tendrá un peso 4, en donde se evalúa el riesgo que una avería o falla puede representar para la salud y seguridad de los trabajadores. La integridad física del personal de trabajo es primordial, por lo que los activos que puedan comprometerla deben ser de alta prioridad (Venegas, 2022).
- **Impacto al Medio Ambiente (IM):** Este criterio tendrá un peso 4, ya que analiza las posibles consecuencias ambientales derivadas de la falla de un componente, como emisiones contaminantes o derrames de sustancias tóxicas, siendo importante este criterio por la responsabilidad ambiental y el cumplimiento de las normativas (Venegas, 2022).
- **Impacto a la Mantenibilidad (IMN):** Este criterio tendrá un peso 3, debido a la facilidad o dificultad para hacer las tareas de mantenimiento, evaluando los equipos de difícil acceso o con diseños más complicados que pueden requerir más tiempo y recursos para su operatividad (Venegas, 2022).

2.7 Jerarquización de fallas

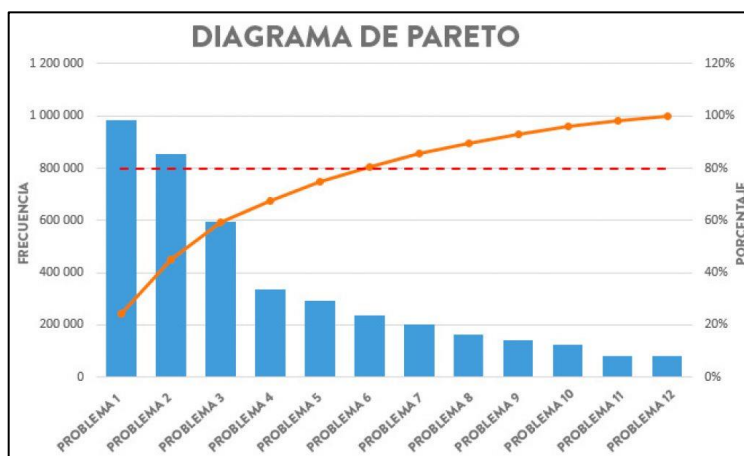
2.7.1 Diagrama de Pareto

Es una herramienta gráfica utilizada para priorizar los problemas o fallas de un sistema con base en su frecuencia o impacto acumulado, siguiendo el principio de 80-20, en donde establece que el 80% de las problemáticas suelen ser causados por el 20% de las causas principales. Este enfoque permite centrar los esfuerzos en las áreas que generan mayor impacto operativo o económico. Su aplicación técnica tiene la siguiente jerarquización de fallas:

- Identificación de fallas: Se recolectan ciertos datos de las fallas ocurridas, como frecuencia, costo asociado y tiempo de inactividad.
- Clasificación de las fallas: Los datos se organizan en categorías representativas, agrupando eventos similares o que tengan impactos relacionados.
- Orden y gráfico: Las fallas se ordenan de mayor a menor impacto, para ello se representarán en un gráfico combinado de barras y de líneas acumulativas para facilitar la identificación de las fallas críticas.
- Análisis y priorización: Las fallas que se encuentren dentro del rango superior se consideran como prioritarias para las cuales se implementan acciones correctivas.

Figura 4

Ejemplo diagrama de Pareto



Nota. Alberto. (2024). Máster logística.

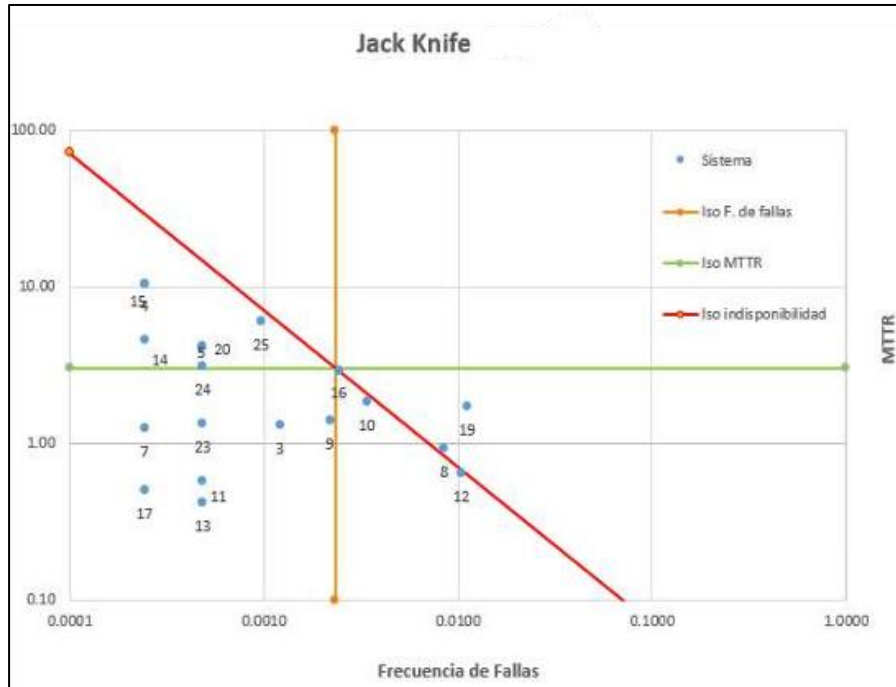
2.7.2 Diagrama de Jack Knife

Es una herramienta analítica empleada en la evaluación jerárquica de fallas, destacándose por su capacidad para analizar contribuciones individuales al rendimiento global de un sistema. Este método permite cuantificar el impacto relativo de cada fila, identificando aquellas que ejercen mayor influencia en la eficiencia operativa. Las etapas clave en su implementación son:

- Recopilación de datos: Se registran las fallas observadas, considerando su frecuencia, duración, costos asociados y otros indicadores técnicos relevantes.
- Evaluación de impacto: Cada falla se elimina hipotéticamente del sistema para evaluar cómo afecta su ausencia al desempeño total del sistema.
- Cálculo del índice de relevancia: Se determina un valor cuantitativo que mide la importancia relativa de cada falla. Este índice permite establecer una jerarquía basada en la contribución individual al problema global.
- Representación visual: Los resultados se presentan en un gráfico que muestra el impacto acumulativo de eliminar cada fila en comparación con las demás.

Figura 5

Ejemplo diagrama de Jack Knife



Nota. Rodríguez. (2021). Metodología de Jack Knife para determinar los niveles de criticidad en sistemas de jumbos Long Hole – Unidad minera Yauliyacu.

2.8 Herramientas de diagnóstico

2.8.1 Análisis de causa raíz

Es una técnica sistemática orientada a identificar y abordar las causas fundamentales de fallas o problemas en sistemas operativos y técnicos; en donde su enfoque no solo limita a la corrección inmediata del problema, sino también a la prevención de su recurrencia mediante soluciones sostenibles (AENOR, 2015).

2.8.1.1 Etapas.

- **Definición del problema:** Especifica con precisión el fallo descubierto y delimita el alcance con sus posibles consecuencias de operación.
- **Recopilación de datos técnicos:** Involucra la recolección del historial de fallas en operación, así como los parámetros relevantes.

- **Determinación de causa raíz:** Usa metodologías como el diagrama de Ishikawa o el análisis de los 5 porqué para descomponer las probables causas.
- **Validación y análisis:** Compara las causas identificadas con datos estadísticos y técnicos para confirmar su relevancia.
- **Propuesta de soluciones:** Diseña y evalúa acciones correctivas que elimine de forma definitiva la causa raíz bajo viabilidad técnica, operacional y económica.

2.8.2 *Árbol de fallas*

Es una herramienta de modelo lógico que permite estudiar y representar gráficamente las posibles combinaciones de fallos en componentes individuales que podrían provocar un fallo en planta (Ávila y Martins, 2023).

2.8.2.1 Etapas.

- **Definición del evento crítico:** Describe el evento estableciendo su impacto en la producción.
- **Descomposición estructural:** Identificación jerárquica y lógica de las posibles causas que contribuyen al evento principal, desglosándolas en niveles inferiores hasta tener eventos básicos.
- **Representación lógica:** Uso de puertas lógicas estándar como la puerta AND para eventos simultáneos y la puerta OR para eventos compartidos.
- **Análisis cuantitativo:** Se calcula la probabilidad de ocurrencia en eventos combinados e individuales, hasta determinar el fallo del sistema.
- **Propuesta de mitigación:** Identifica puntos críticos dentro del árbol y luego implementa medidas de mitigación.

2.9 Disponibilidad y utilización de planta

2.9.1 Factores que afectan la disponibilidad.

La disponibilidad se refiere a como un equipo cumple con su función prevista de trabajo cuando le corresponde, indicador que es expresado mediante porcentajes bajo la confiabilidad de los equipos. Es por ello que los principales factores que se consideran son los tiempos de parada programada para el correspondiente mantenimiento de equipos, las inesperadas fallas y la eficacia en los procesos de reparación, los mismos que van acompañados de la calidad de los datos históricos para identificar prioridades de roles y prever acciones necesarias (Rosales, 2023).

2.9.2 Impacto de tiempos improductivos.

Estos impactos son el resultado de múltiples fallas durante operación, los mismos que no están planificados y que generan deficiencias en el rendimiento global de la planta. Esto se debe a que la capacidad de producción final no es la óptima y por el aumento de costos operativos no previstos, generando pérdidas significativas (Rosales, 2023).

2.9.3 Estrategias de mejora.

Se requiere implementar estrategias que estén basadas en el análisis de datos y metodologías de mantenimiento efectivas, considerando las necesidades de trabajo de cada activo y el contexto operativo en el que se encuentran.

- Utilizar herramientas de monitoreo digital
- Programas que mejoren el tiempo de mantenimiento
- Disponibilidad de los repuestos y recursos necesarios
- Capacitación activa de los colaboradores
- Indicadores KPI dentro de rangos permitidos

CAPÍTULO III. Metodología de la investigación

3.1 Tipo, Enfoque y Diseño de la Investigación

3.1.1 Método de la investigación

El método utilizado es de tipo analítico – descriptivo, ya que busca examinar de manera sistemática los modos de falla de los molinos SAG en la unidad minera Constancia, identificando patrones recurrentes y sus causas raíz. Este análisis se sustenta en el enfoque de confiabilidad operacional y normativas internacionales como la ISO 14224 y BS EN 62740.

3.1.2 Tipo de la investigación

El presente estudio es de tipo aplicada porque busca resolver un problema práctico al mejorar la disponibilidad de los molinos SAG; y de nivel exploratorio – explicativo, porque indaga las relacionales causales entre los modos de falla y su impacto en el desempeño de la planta.

3.1.3 Enfoque de la investigación

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en el análisis de datos históricos de fallas de los molinos SAG de la unidad minera. Para ello, se utilizaron el Diagrama de Pareto y el método Jack-Knife, permitiendo jerarquizar los modos de falla según su impacto. Asimismo, se aplicaron el Análisis de Causa Raíz y el Árbol de Fallas para determinar sus causas principales. Finalmente, se evaluó la disponibilidad de los equipos mediante indicadores como MTBF y MTTR, asegurando un diagnóstico preciso.

3.1.4 Diseño de la investigación

El diseño es no experimental, ya que no se manipulan las variables directamente, y el análisis se centra en datos históricos y eventos ya ocurridos en un periodo delimitado de los años 2022, 2023 y 2024.

3.2 Variables y Operacionalización

3.2.1 *Variable Independiente*

Gestión de fallas en Molinos SAG, definida como las estrategias y análisis aplicados a identificar y mitigar los modos de falla.

3.2.2 *Variable Dependiente*

Disponibilidad de los Molinos SAG, el cual representa el porcentaje de tiempo en que los molinos están operativos y disponibles para el proceso de producción.

3.3 Población, Muestra y Muestreo

3.3.1 *Población*

La población está constituida por todos los eventos de falla registrados en los molinos SAG de la unidad minera Constancia durante los años 2022, 2023 y 2024.

3.3.2 *Muestra*

La muestra corresponde a los modos de falla más frecuentes y críticos, seleccionados a través del análisis de Pareto y Jack Knife, priorizando aquellos con mayor impacto en la disponibilidad.

3.3.3 *Muestreo*

Se emplea un muestreo no probabilístico por conveniencia, centrado en los datos históricos de fallas disponibles en los registros de mantenimiento y confiabilidad.

3.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

3.4.1.1 Análisis documental. Revisión del historial de fallas registradas en el sistema SAP de la unidad minera, incluyendo la taxonomía de equipos y jerarquías funcionales. Además de la evaluación de reportes de desempeño operacional y registros de mantenimiento basado en la confiabilidad.

3.4.1.2 Observación directa. Inspecciones en planta para observar las condiciones reales de operación y los factores externos que puedan incidir en los modos de falla.

3.4.1.3 Entrevistas estructurales y talleres participativos. Realización de entrevistas a operadores, supervisores y especialistas en mantenimiento; para validar y complementar la información obtenida en los registros, promoviendo el análisis colaborativo de fallas críticas.

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

3.4.2.1 SAP ERP, PISystem, RtDuet. Herramientas principales para extraer registros de fallas y establecer la clasificación taxonómica de los equipos.

3.4.2.2 Formatos estandarizados de inspección y registro. Diseñados para capturar información técnica relevante durante visitas a planta y entrevistas.

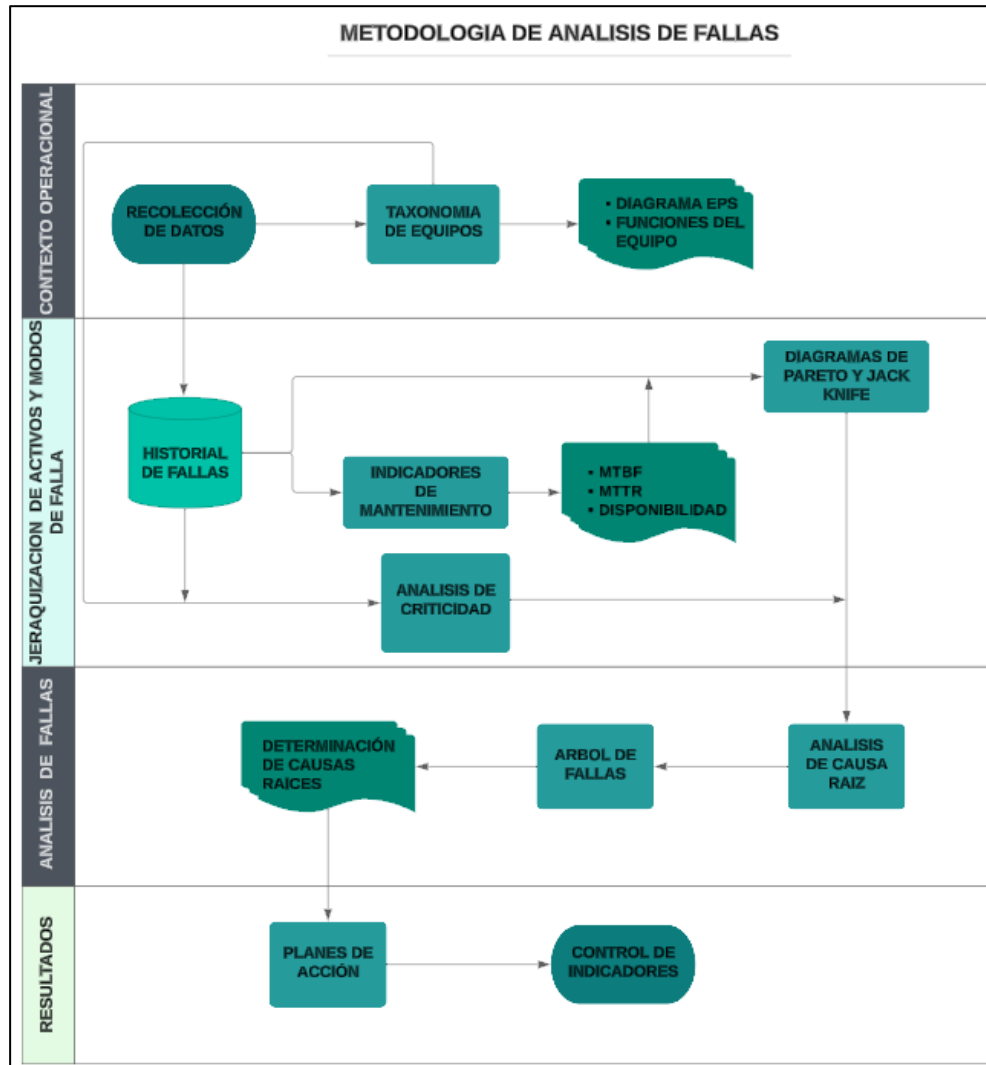
3.4.2.3 Software de análisis de datos. POWERBI, Excel y herramientas especializadas para modelar y graficar tendencias de fallas, incluyendo diagramas de Pareto, Jack Knife y árboles de fallas.

3.5 Procedimiento

Se establece el siguiente diagrama de flujo, para mostrar y ordenar el proceso de análisis de fallas desarrollado en el presente trabajo, elaborado en base a los lineamientos y principios de la confiabilidad operacional, recogiendo también las pautas dadas en las normas ISO 142124, y BS EN 62740, que se resume en los siguientes pasos:

Figura 6

Metodología de Análisis de fallas



Nota. Elaboración propia.

3.5.1 Establecimiento del contexto operacional

La primera etapa será recopilar y ordenar la información del proceso, sistema y equipo, mediante la taxonomía definida por la norma ISO 14224, que clasifica sistemáticamente los equipos según sus características comunes (localización, uso, tipo de equipo, etc.). Esta clasificación permite ubicar a los molinos SAG dentro del proceso productivo y establecer su relevancia dentro de la organización. Por otro lado, se define el contexto operativo como “el

conjunto de condiciones reales del proceso bajo las cuales opera el equipo, incluyendo criterios y parámetros de desempeño deseados por el usuario”. Esta información es esencial para evaluar el desempeño de los molinos en cuanto al cumplimiento de sus funciones y requerimientos de la operación, así como también para definir los modos de falla que originan las paradas de los molinos.

3.5.2 Jerarquización de activos y modos de falla

En esta etapa se realiza el análisis de criticidad de los equipos aplicando metodologías de la confiabilidad que permiten establecer jerarquías o prioridades de procesos, sistemas y equipos creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionado el esfuerzo y los requisitos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional. Con ello, se identifica a los molinos SAG como equipos de alta criticidad debido a su elevado impacto en el desempeño operativo de la planta, además que también ayuda a establecer la metodología para el análisis de fallas, pues en este caso es el análisis de causa raíz, que normalmente se implementa en equipos de alta criticidad.

Para determinar los modos de falla más recurrentes y su contribución al tiempo de inactividad, se emplean herramientas como los diagramas de Pareto y Jack Knife. Estas herramientas permiten priorizar los esfuerzos en las fallas con mayor incidencia y evaluar su efecto sobre la disponibilidad de los equipos.

3.5.3 Análisis de fallas

Identificados y evaluados los modos de falla de mayor impacto, se implementa la metodología del ACR y en específico la técnica de árbol lógico de fallas para encontrar los diferentes factores causales de índole físicas, humanos y/o latentes.

3.5.4 Propuesta de soluciones

Sobre los diferentes factores causales encontrados se implementa planes de acción con el objetivo de controlar y mitigar los efectos de estos eventos y presentar en un lapso de tiempo la efectividad de dichas medidas sobre los indicadores de desempeño de la planta.

3.6 Aspectos éticos

3.6.1 *Confidencialidad y manejo de datos*

Se asegura que los datos extraídos del SAP y cualquier información proporcionada por la unidad minera sean tratados bajo estricta confidencialidad, utilizándose únicamente para fines del presente estudio.

3.6.2 *Consentimiento informado*

El personal involucrado será informado sobre los objetivos y el alcance del estudio, asegurando su participación voluntaria y el anonimato de sus aportes.

3.6.3 *Cumplimiento normativo*

El análisis se realizará en estricto cumplimiento de las normas ISO 14224 y EN 62740, garantizando alineación con estándares internacionales en gestión de activos y confiabilidad operacional.

3.6.4 *Responsabilidad social*

Se busca que las soluciones propuestas no solo optimicen los indicadores de disponibilidad, sino que también minimicen riesgos operativos, mejorando las condiciones de trabajo del personal técnico y su desempeño.

CAPÍTULO IV. Análisis de resultados

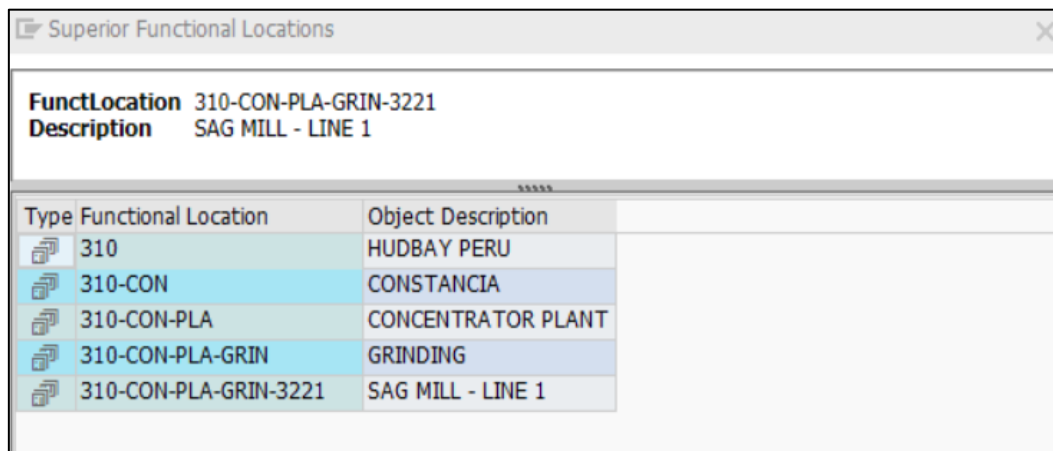
4.1 Contexto operacional

4.1.1 Taxonomía de los equipos

En la **Figura 7** se muestra la ubicación funcional de los equipos establecida en el SAP de la unidad minera, información con la cual se establece la taxonomía de los equipos de la planta, en particular de los molinos SAG.

Figura 7

Jerarquía de equipos establecida en el SAP



The screenshot shows the 'Superior Functional Locations' window in SAP. It displays a hierarchy of functional locations. The top level is '310-CON-PLA-GRIN-3221' with the description 'SAG MILL - LINE 1'. Below this, a table lists the hierarchy levels:

Type	Functional Location	Object Description
	310	HUDBAY PERU
	310-CON	CONSTANCIA
	310-CON-PLA	CONCENTRATOR PLANT
	310-CON-PLA-GRIN	GRINDING
	310-CON-PLA-GRIN-3221	SAG MILL - LINE 1

Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

En la **figura 8** se detalla la jerarquización taxonómica y la codificación SAP aplicados a los equipos de la empresa, específicamente relacionados con el molino SAG. Esta estructura permite identificar de manera clara y ordenada los niveles jerárquicos desde la industria hasta las piezas individuales del equipo, lo que facilita la gestión integral de los activos. Además, este sistema de clasificación es fundamental para optimizar el mantenimiento, al proporcionar una referencia precisa para la localización de componentes críticos y subunidades. De este modo, se mejora la trazabilidad en las actividades de mantenimiento, permitiendo una toma de decisiones

más eficiente para garantizar la continuidad operativa y maximizar la disponibilidad de los equipos.

Figura 8

Clasificación taxonómica de los equipos de planta

Categoría Principal	Nivel Taxonomico	Jeraquia de taxnomia	Descripcion	Codificaion sap
Datos de uso/ubicación	1	Industria	MINERIA	HB
	2	Categoría del negocio	HUBAY PERU (Produccion de Cu)	310
	3	Categoría de la instalacion	UNIDAD MINERA CONSTANCIA (open pit)	310-CON
	4	Categoría del planta	PLANTA CONCETRADORA (planta de sulfuros)	310-CON-PLA
	5	Seccion/sistema	CHANCADO/MOLIENDA/FIOTACION/ESPESADORES/FILTRADO/RELAVES	310-CON-PLA-GRIN
Subdivisión de equipos	6	Clase de equipo/unidad	MOLINO SAG /MOLINO DE BOLAS/FAJAS TRANSPORTADORAS/ALIMENTADORES DE PLACAS/BOMBAS DE PULPA/CICLONES	ML001/ML002/ML003/ML004/CV002/CV003/CV004/CV005/CV006/CV007/FE001/FE002/FE003/FE004/FE005/CY001/CY002/PU001/PU002
	7	Sub-unidad	SISTEMAS DE LUBRICACION Y ENGRASE /SISTEMA DE ACCIONAMIENTO Y ARRANQUE, LINERS, CHUTES DE ALIMENTACION Y DESCARGA	
	8	Componente/Item mantenible	REDUCTOR/ PIÑON/INCHING DRIVE/ LINERS/TROMELL/BOMBAS DE LUBRICACION	
	9	Pieza	RODAMIENTOS, LINERS, MALLAS, SENSORES/ACOPLE/SELLOS	

Nota. Elaboración propia.

4.1.2 Contexto operativo actual

El molino SAG, es un cilindro de 36 pies de diámetro x 26,5 pies de largo; cuenta con un sistema de doble piñón de ataque, con una velocidad variable accionada por dos motores de 8000 kW de potencia instalada, siendo capaces de recibir mineral a un tamaño de 115 mm (F80). Del mismo modo, el diámetro interno del molino es de 10,97 metros y su longitud de molienda efectiva es de 7,3 metros, con un rango de velocidad de 7.91 RPM a 10,24 RPM lo que representa el 62 a 80 % de la velocidad crítica; es decir con un valor crítico de 12.8 RPM aproximadamente. Por otro lado, la carga total ocupa hasta el 28% del volumen del molino, considerando que las bolas de molienda por sí mismas ocupan alrededor del 15% del volumen total de la máquina. Asimismo, el contenido de agua

de la pulpa es controlado en proporción al peso del mineral que está siendo alimentado desde las pilas de mineral para lograr la densidad deseada de pulpa dentro del molino.

Por otro lado, el volumen de procesamiento de mineral es actualmente de 31 Mtpa, lo que equivale a una tasa de tratamiento diaria de 90 Ktpd. El circuito de molienda consta de dos líneas en paralelo en un arreglo SAB (molino SAG-Bolas), y el procesamiento del mineral se realiza de manera continua durante las 24 horas, los 7 días a la semana. Cabe resaltar que los molinos SAG no pueden permanecer sin carga por más de 5 minutos.

Para el mantenimiento de los molinos, se tienen planificadas seis paradas de planta al año, con intervalos de 45 días. Estas se distribuyen de la siguiente manera: dos paradas mayores con un intervalo de 180 días, programadas para una duración de 115 horas, durante las cuales se realizan reparaciones y se cambian componentes mayores; y cuatro paradas cortas, programadas para 8 horas por línea, distribuida entre las paradas mayores, destinadas a inspecciones y correctivos según la condición. Este esquema permite alcanzar una disponibilidad anual requerida del 96.4%.

En la **tabla 1**, HUDBAY (2021) nos indica los siguientes parámetros de operación.

Tabla 1

Datos generales del molino SAG

ESPECIFICACIONES GENERALES DEL MOLINO SAG	
TAG	3221-ML-001/ML003
Proveedor	FLSmidth
Tamaño del Molino	10,973 m [36 pies] diámetro 8.077 m [26.5 pies] largo
Tipo de Molienda	Molienda húmeda
Potencia del motor	8000 KW x 2
Tipo de motor	Inducción de rotor bobinado 1795 rpm
DATOS DE OPERACIÓN DEL MOLINO SAG	
Circuito de operación	Circuito cerrado
Carga de bolas del molino en operación	15% por volumen
Carga total del molino en operación	25% por volumen

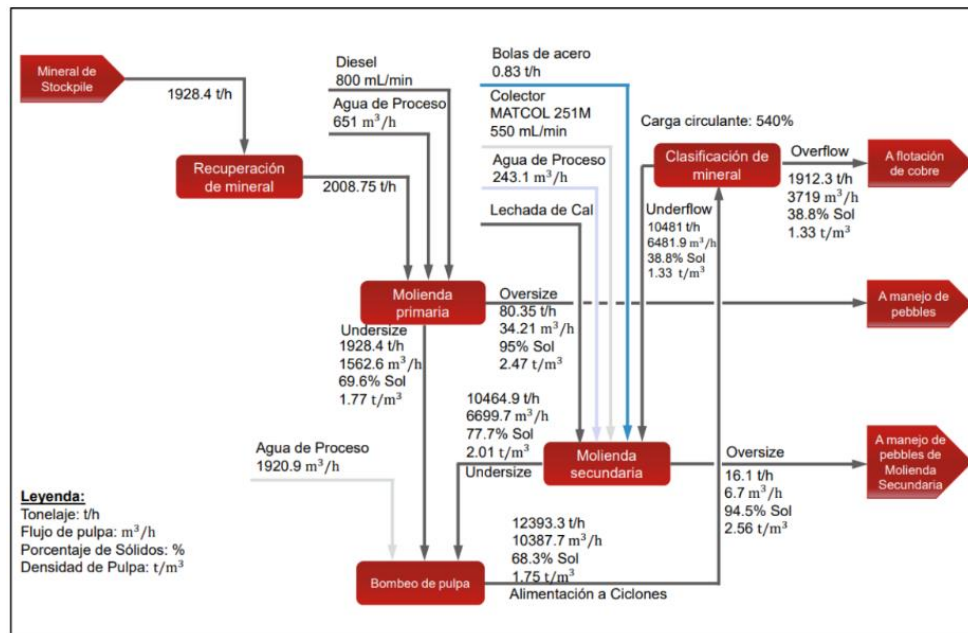
La **figura 9** muestra un esquema funcional del sistema de operación del molino SAG utilizado en la planta de procesamiento de minerales para su operación, monitoreo y mantenimiento. A continuación, se detalla cada componente y su función dentro del proceso:

1. **Agua de enfriamiento y agua de proceso:** El sistema utiliza agua de enfriamiento proveniente de las unidades identificadas como 3516-CT-001/002, la cual es vital para el control de temperatura del equipo, específicamente para la refrigeración del aceite de lubricación. También se utiliza agua de proceso de 3511-PU-300/301/302/303, necesaria para el transporte y acondicionamiento de la pulpa en el molino.
2. **Mineral chancado (entrada al molino SAG):** El mineral chancado procedente de la cinta transportadora 3213-CV-002, es depositado en el cajón de alimentación (3221-DI-006), que sirve como punto de entrada al molino SAG (3221-ML-001). Este material es procesado para reducir su tamaño y facilitar las etapas posteriores.
3. **Molino SAG (3221-ML-001):** Es el equipo central donde ocurre la conminación del mineral. En este punto, el material se muele mediante la acción combinada de las bolas de acero y el impacto generado por el volteo dentro del cilindro.
4. **Refrigeración del sistema:** La refrigeración del aceite de lubricación se asegura a través de un sistema de enfriamiento representado en la imagen, garantizando un funcionamiento adecuado del molino y evitando el sobrecalentamiento.
5. **Descarga del molino:** El producto procesado en el molino SAG es descargado hacia el cajón de bomba hidrociclones primarios (3225-HP-001), desde donde es derivado mediante la bomba de alimentación (3225-PU-001) hacia la batería de hidrociclones primarios (3225-CY-001).
6. **Separación de partículas:** En los hidrociclones se lleva a cabo la clasificación del material según el tamaño de las partículas. El material fino continúa hacia etapas posteriores, mientras que el material más grueso puede ser reciclado hacia el molino.

7. **Bombas sumidero:** Se destacan las bombas sumidero (3221-PU-005 y 3222-PU-006) encargadas de drenar y transportar agua o pulpa acumulada en el área de molienda, contribuyendo al mantenimiento del flujo continuo del proceso.
8. **Retorno de agua de enfriamiento:** El agua utilizada en el sistema de enfriamiento es retornada a la unidad 3516-TK-055 para su reutilización, optimizando los recursos hídricos del sistema.

Figura 10

Diagrama de bloques de molienda



Nota. Manual HUSBAY. (2024).

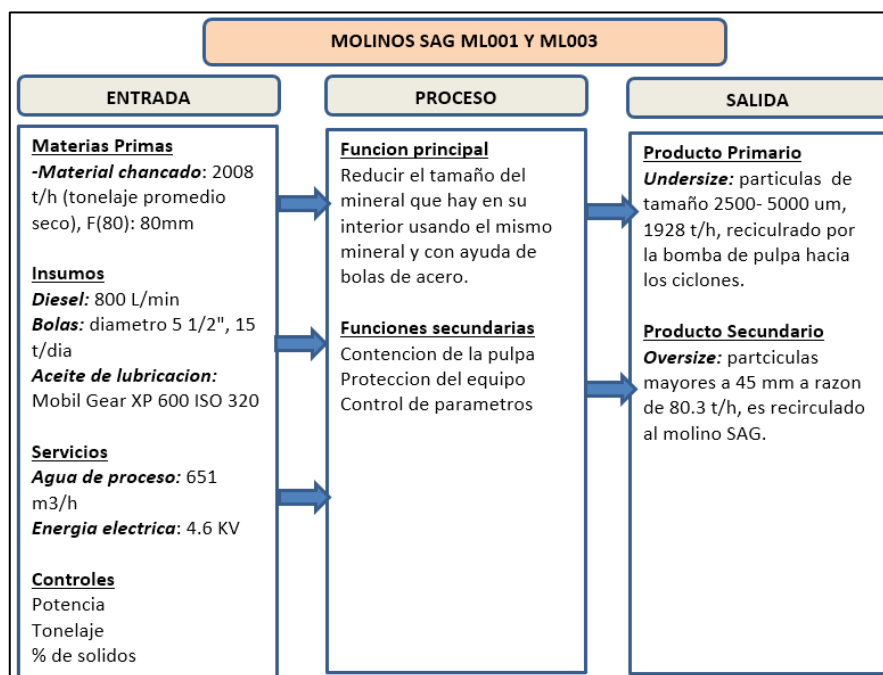
En la **figura 10** se muestra el diagrama de bloques del área de molienda de la unidad minera, en donde se ilustra el flujo del mineral desde el stockpile hasta la clasificación final, destacando la molienda primaria y secundaria. Comienza con un tonelaje de 1928.4 t/h de mineral, que se recupera y se somete a molienda primaria, donde se utilizan agua de proceso y bolas de acero, generando oversize y undersize con un 69.6% de sólidos. Posteriormente, el material pasa a la molienda secundaria, donde se ajusta aún más su tamaño, logrando un flujo

de 12393.3 metros cúbicos por hora en oversize y 10387.7 metros cúbicos por hora en undersize. Finalmente, el mineral se clasifica, separando el overflow y underflow, antes de proceder a la flotación de cobre y al manejo de pebbles, lo que es crucial para optimizar la eficiencia y disponibilidad de los molinos SAG en el proceso de extracción.

En la **figura 11** se muestra el diagrama EPS del molino SAG.

Figura 11

Diagrama EPS de molinos



Nota. Elaboración propia.

4.1.4 Funciones de los molinos SAG

Se define a continuación las funciones primarias y secundarias de los molinos establecidas para el contexto operativo descrito en el punto 4.1.2.

Tabla 2

Funciones de los molinos

Ítem	Unidad	Funciones	Descripción
1	Molino SAG	Primaria	- Reducir el tamaño de mineral de 100 -120 mm a 2500-5000um a una tasa de procesamiento de 1800 – 2200 tmph (material seco), mezcla con una proporción de mineral y agua que tenga una densidad 1.77-2.47 Tm/h, a una velocidad de 7.91 – 10.24 RPM.
		Secundarias	- Controlar el tonelaje - Controlar el nivel de impacto y ruido - Contener el mineral sin derrames - Clasificar la descarga - Control y protección de molino con sensores de vibración, temperatura, flujo, etc.

Nota. Unidad minera Constanca. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

4.1.5 Funciones de los componentes

Tabla 3

Funciones de los componentes

Ítem	Sub-Unidad	Función
1	Motor principal	Transforma la energía eléctrica en energía mecánica rotativa con un pequeño momento de torsión, para luego transmitirla a los reductores principales. Posee una potencia de 8,000 kilovatios, una velocidad de 896 revoluciones por minuto y un torque de 85,261.58 newton-metro.
2	Reductor principal	Aumenta el momento de fuerza disminuyendo la velocidad mediante el uso de engranajes a una determinada proporción. La disminución de 5.63 se produce al reducir la velocidad de 895 revoluciones por minuto a 158.79 rpm al transmitir la energía a los piñones del contra eje.
3	Acoplamientos	Extiende y une las líneas de transmisión entre el eje del reductor - contra eje y el motor - reductor.
4	Contra eje	Transfiere la energía mecánica del eje del piñón a la corona que está montada en el cuerpo del molino, generando su giro.

5	Corona	Aumenta el torque disminuyendo la velocidad mediante el uso de engranajes a una determinada proporción de reducción de 17.14, pasando de 158.79 a 9.31 rpm, al ser transferida al molino.
6	Trunnion de alimentación	Sostiene hidrostáticamente el extremo de alimentación de la máquina con el apoyo de muñones fijos.
7	Trunnion de descarga	Sostiene hidrostáticamente el extremo de descarga de la máquina con el apoyo de muñones móviles.
8	Ensamble estructural del cilindro y tapas	Lleva a cabo el procedimiento de contención y reducción del tamaño del mineral de 100 a 120 mm a 2500-5000 um, con un caudal de pulpa de entrada aproximado entre 2200 a 3000 m ³ /h, manteniendo una proporción óptima de mineral/agua para la molienda, con una densidad promedio de 1.9-2.1 ton/m ³ y una velocidad de rotación en sentido horario entre 7.91 a 10.24 rpm.
9	Liners	Preservar la integridad de la estructura del molino ante el deterioro causado por la abrasión. Por otro lado, los revestimientos del cilindro del molino cumplen la función de facilitar la transferencia de energía y controlar el movimiento de la carga, así como la distribución de energía de los eventos de impacto en la molienda. Del mismo modo, los recubrimientos de las tapas de descarga y la presencia de rejillas tienen como finalidades retener los medios de molienda, clasificar los productos y llevar un control del nivel de llenado y transporte de la masa.
10	Trommel	La clasificación de la descarga del molino consiste en recircular el material que supera el tamaño establecido de 18 mm, con el fin de que sea nuevamente sometido al proceso de molienda adicional.
11	Motor Auxiliar	Transforma la energía eléctrica en energía mecánica rotativa con un momento de torque bajo transmitiéndolo al reductor auxiliar. Este giro lleva una potencia de 230 kilovatios y 1785 rpm.
12	Reductor auxiliar	Aumentar el momento de fuerza disminuyendo la velocidad mediante el uso de engranajes a una proporción de reducción de 168 rpm, transfiriendo la energía a los reductores.
13	Acoplamientos auxiliares	Conectan y desconectan los ejes del motor – reductor auxiliar con los ejes del reductor auxiliar y principal.
14	Chute de alimentación	Almacenar y movilizar el mineral desde el punto de descarga de la cinta transportadora hacia la parte interior del molino.
15	Sistema de lubricación	Los sistemas que posee: Sistema de lubricación del cojinete principal, sistema de lubricación de chumaceras del motor, sistema de lubricación de reductor y chumaceras del piñón, sistema de lubricación de corona y piñón. Los cuales son los encargados de refrigerar los componentes para un movimiento rotatorio eficiente.

Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

4.2 Jerarquización de activos y modos de falla

4.2.1 Análisis de criticidad

Para la evaluación de criticidad de los equipos será necesario clasificarlos de acuerdo con los pesos de la **tabla 4** siguiendo los criterios de evaluación de los **anexos 6 y 7**

Tabla 4

Pesos asignados a los criterios de evaluación

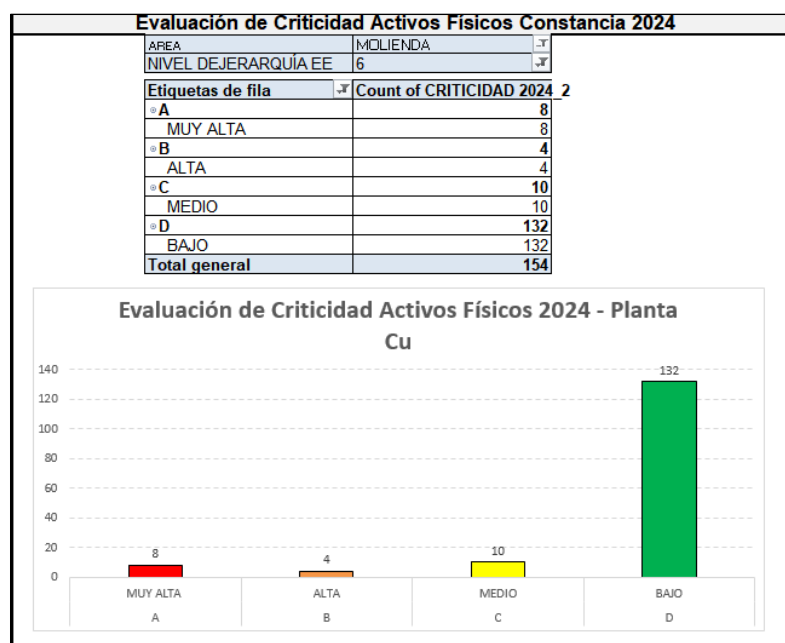
CRITERIO	PESO
Impacto a la Producción (IP)	4
Ocurrencia de Falla (OF)	3
Costos de Mantenimiento (CM)	2
Impacto en la Seguridad y Salud (ISS)	4
Impacto al Medio Ambiente (IM)	4
Impacto a la Mantenibilidad (IMN)	3

Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Se obtuvieron los siguientes resultados de criticidad del área de molienda en dos niveles taxonómicos, en nivel 6 de clase equipos y en el nivel 8 de componentes o ítems mantenibles.

Figura 12

Evaluación de criticidad de los activos físicos



Nota. Unidad Minera Constanca. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

4.2.1.1 Distribución de criticidad.

- La mayoría de los activos del área de molienda (132) se encuentran en la categoría “bajo”, lo que indica que es poco probable que causen daños significativos en caso de falla.
- Hay un número menor de activos en las categorías “muy alta, alta y medio”, lo que sugiere que la mayoría de los equipos son relativamente confiables.

4.2.1.2 Acciones recomendadas.

- Para los equipos en categorías “muy alta y alta”, se deben implementar técnicas reactivas y proactivas para mitigar riesgos.
- Para los activos en la categoría “medio”, se recomienda un mantenimiento regular.
- Los activos en la categoría “bajo” pueden seguir un plan de mantenimiento general.

Tabla 5

Resultados de evaluación de criticidad de equipos del área de molienda

CODIGO TAG	NOMBRE DEL EQUIPO (Español)	IMPACTO O PRODUCCION (IP)	VALOR 1	OCURRENCIA A FALLA (OF)	VALOR 2	COSTO MTTO (CM)	VALOR 3	IMPACTO EN SS (ISS)	VALOR 4	IMPACTO MEDIO AMBIENTE (IMA)	VALOR 5	IMPACTO MANTENIBILIDAD (IM)	VALOR 6	FACTOR DE CRITICIDAD D 2024	NIVEL DE CRITICIDAD D 2024	CRITICIDAD D 2024
3211-FE-002	APRON FEEDER	MEDIO	2	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MEDIO	2	29	MEDIO	C
3211-FE-003	APRON FEEDER	MEDIO	2	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MEDIO	2	29	MEDIO	C
3212-FE-004	APRON FEEDER	MEDIO	2	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MEDIO	2	29	MEDIO	C
3211-FE-005	APRON FEEDER	MEDIO	2	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MEDIO	2	29	MEDIO	C
3213-CV-002	FAJA DE ALIMENTACIÓN SAG 1	ALTA	3	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY ALTA	4	62	MUY ALTA	A
3214-CV-003	FAJA DE ALIMENTACIÓN SAG 2	ALTA	3	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY ALTA	4	62	MUY ALTA	A
3241-CV-004	FAJA DE ALIMENTACIÓN PEBBLES 1	ALTA	3	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY ALTA	4	62	MUY ALTA	A
3241-DV-001	DIVERTER 1	MEDIO	2	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	BAJO	1	22	MEDIO	C
3241-CV-005	FAJA DE ALIMENTACIÓN PEBBLES 2	ALTA	3	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY ALTA	4	62	MUY ALTA	A
3242-DV-002	DIVERTER 2	MEDIO	2	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	BAJO	1	22	MEDIO	C
3221-ML-001	MOLINO SAG	ALTA	3	MUY ALTA	4	MUY ALTA	4	MUY ALTA	4	BAJO	1	MUY ALTA	4	64	MUY ALTA	A
3222-ML-002	MOLINO BOLAS	ALTA	3	MUY ALTA	4	MUY ALTA	4	MUY ALTA	4	BAJO	1	MUY ALTA	4	64	MUY ALTA	A
3223-ML-003	MOLINO SAG	ALTA	3	MUY ALTA	4	MUY ALTA	4	MUY ALTA	4	BAJO	1	MUY ALTA	4	64	MUY ALTA	A
3224-ML-004	MOLINO BOLAS	ALTA	3	MUY ALTA	4	MUY ALTA	4	MUY ALTA	4	BAJO	1	MUY ALTA	4	64	MUY ALTA	A
3225-HP-001	HOPPER DE ALIMENTACION	MEDIO	2	MUY BAJO	0	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MEDIO	2	32	MEDIO	C
3225-PU-001	BOMBA DE CICLONES	ALTA	3	MEDIO	2	MEDIO	2	ALTA	3	MEDIO	2	ALTA	3	51	ALTA	B
3225-CY-001	NIDO DE CICLONES	MEDIO	2	BAJO	1	BAJO	1	MUY ALTA	4	MUY BAJO	0	ALTA	3	38	MEDIO	C
3226-HP-002	HOPPER DE ALIMENTACION	MEDIO	2	MUY BAJO	0	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MEDIO	2	32	MEDIO	C
3226-PU-002	BOMBA DE CICLONES	ALTA	3	MEDIO	2	MEDIO	2	ALTA	3	MEDIO	2	ALTA	3	51	ALTA	B
3226-CY-002	NIDO DE CICLONES	MEDIO	2	BAJO	1	BAJO	1	MUY ALTA	4	MUY BAJO	0	ALTA	3	38	MEDIO	C
3227-HT-001	PUENTE GRUA	ALTA	3	BAJO	1	BAJO	1	MUY ALTA	4	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	45	ALTA	B
3228-PV-016	TANQUE PULMON, MOLIENDA	ALTA	3	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY ALTA	4	MUY BAJO	0	ALTA	3	41	ALTA	B

Nota. Unidad Minera Constanica. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Tabla 6

Resultados de evaluación de criticidad de componentes de los molinos

NOMBRE DEL EQUIPO (Español)	IMPACTO A LA PRODUCCI ON (IP)	VALOR 1	OCURREN CIA FALLA (OF)	VALOR 2	COSTO MTTO (CM)	VALOR 3	IMPACTO EN SS (ISS)	VALOR 4	IMPACTO EN MEDIO AMBIENTE (IMA)	VALOR 5	IMPACTO EN LA MANTENIB ILIDAD (IM)	VALOR 6	FACTOR DE LA CRITICIDAD 2024	NIVEL DE CRITICIDAD 2024	CRITICIDAD 2024
LRS	ALTA	3	BAJO	1	MUY ALTA	4	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	33	MEDIO	C
SER DRIVE	MEDIO	2	BAJO	1	ALTA	3	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MEDIO	2	31	MEDIO	C
MOTOR PRINCIPAL 1	ALTA	3	BAJO	1	MUY ALTA	4	BAJO	1	MUY BAJO	0	ALTA	3	36	MEDIO	C
ARRANCADOR (SWITCH)	ALTA	3	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	28	MEDIO	C
MOTOR PRINCIPAL 2	ALTA	3	BAJO	1	MUY ALTA	4	BAJO	1	MUY BAJO	0	ALTA	3	36	MEDIO	C
ARRANCADOR (SWITCH)	ALTA	3	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	28	MEDIO	C
REDUCTOR PRINCIPAL 1	ALTA	3	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY BAJO	0	ALTA	3	36	MEDIO	C
REDUCTOR PRINCIPAL 2	ALTA	3	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY BAJO	0	ALTA	3	36	MEDIO	C
INCHING DRIVE	MUY BAJO	0	BAJO	1	MUY BAJO	0	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	13	BAJO	D
ACOPLES TRANSMISIÓN (ICING DRIVE-MOTOR)	MUY BAJO	0	BAJO	1	MUY BAJO	0	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	13	BAJO	D
CONTRAEJE	ALTA	3	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY BAJO	0	ALTA	3	36	MEDIO	C
CORONA	ALTA	3	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	44	ALTA	B
ACOPLES SISTEMA TRANSMISIÓN (REDUCER-PINION)	ALTA	3	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	ALTA	3	32	MEDIO	C
ACOPLES SISTEMA TRANSMISIÓN (REDUCER-MOTOR)	ALTA	3	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	ALTA	3	32	MEDIO	C
SISTEMA DE MOLIENDA	ALTA	3	BAJO	1	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	47	ALTA	B
ENSAMBLE ESTRUCTURA CILINDRO Y TAPAS	MUY BAJO	0	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY BAJO	0	ALTA	3	29	MEDIO	C
LINERS	ALTA	3	BAJO	1	BAJO	1	ALTA	3	MUY BAJO	0	ALTA	3	38	MEDIO	C
TROMMEL	MUY BAJO	0	BAJO	1	MEDIO	2	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MEDIO	2	21	MEDIO	C
TRUNION ALIMENTACIÓN	ALTA	3	BAJO	1	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	47	ALTA	B
TRUNION DE DESCARGA	ALTA	3	BAJO	1	MUY ALTA	4	ALTA	3	MUY BAJO	0	MUY ALTA	4	47	ALTA	B
INSTRUMENTACIÓN	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MUY BAJO	0	MUY BAJO	0	MUY BAJO	0	6	BAJO	D
COMPUERTA CHUTE MOVIL	MUY BAJO	0	MUY BAJO	0	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	MEDIO	2	14	BAJO	D
PROCESO DE ADICION DE AGUA DE PROCESO	MUY BAJO	0	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	BAJO	1	14	BAJO	D
SISTEMA ALIMENTACION AGUA DE PROCESO	MUY BAJO	0	BAJO	1	MUY BAJO	0	MEDIO	2	MUY BAJO	0	BAJO	1	14	BAJO	D

Nota. Unidad minera Constanica. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

4.2.1.3 Equipos del área de molienda. De un total de 156 equipos evaluados, en la tabla 5 solo se muestran los equipos (22) con mayor índice de criticidad, teniendo una distribución total de:

Muy alta (A): Los 8 equipos clasificados en este nivel representan un 5.1% del total. Estos equipos son fundamentales para el proceso de molienda, lo que significa que su falla tendría un impacto significativo en la producción de la planta. Por lo tanto, deben ser monitoreados de forma constante.

Alta (B): Cuatro equipos en el nivel (2.6%) indican que, aunque no son tan críticos como los del nivel A, aún tienen importancia significativa en la operación de molienda, Los tiempos de inactividad o fallas en estos equipos pueden generar paradas operativas o pérdidas en eficiencia, por lo que deben mantenerse en un estado óptimo.

Medio (C): Con 10 equipos en este nivel (6.4%), se observa que no representan una amenaza inmediata a la producción, pero su mantenimiento sigue siendo importante para evitar que lleguen a un nivel de criticidad mayor. Estos equipos pueden tener fallas menores que afectan la eficiencia de la planta, pero no comprometen gravemente la producción.

4.2.1.4 Componentes de los molinos (Véase tabla 6).

Se evaluaron 24 equipos, teniendo una distribución total de:

Muy alta (A): No se presentó ningún componente en este nivel de criticidad.

Alta (B): Al igual que en los equipos, 4 componentes representan un 16.7% en el nivel B, siendo esenciales para el rendimiento del molino, y su fallo afectaría la operación, siendo prioridad realizar mantenimientos preventivos regulares y monitoreos en tiempo real para evitar fallos inesperados.

Medio (C): Un 58.3% (14 componentes) están clasificados en este nivel. Esto sugiere que la mayoría de los componentes tiene una criticidad intermedia; es decir, aunque no son los más críticos para el equipo, su mal funcionamiento podría derivar en un aumento de costos operativos

o en la reducción de la eficiencia global. Es recomendable seguir un plan inspección y monitoreo periódicos para evitar que estas piezas lleguen a niveles de alta criticidad.

Bajo (D): 6 componentes (25%) están en el nivel D, lo que indica que son los de menor prioridad. Sin embargo, su mayor concentración en el área de componentes podría ser una señal de que existen partes que podrían ser optimizadas para aumentar la fiabilidad de la planta. Estos componentes podrían ser revisados en intervalos más largos, pero siempre asegurando que no haya un deterioro inesperado.

4.2.2 Diagrama de Pareto y Jack Knife

Se muestra el resumen de los eventos de fallas, ocurridos en los molinos SAG, que han tenido mayor impacto en la disponibilidad de la planta durante el período de análisis.

4.2.2.1 Año 2022.

Tabla 7

Frecuencia y tiempos por modo de falla año 2022

ítem	Evento de Falla	Cantidad	Duración total (h)	MTTR	f	F
1	ML003, Outer Grate, Desgaste	2	45.2	22.6	46%	46%
2	ML001, Outer Grate, Rotura	3	25.7	8.6	26%	72%
3	ML003, Malla, Desgaste	1	7.5	7.5	8%	80%
4	ML001, Malla, Caída de malla	3	3.4	1.1	3%	83%
5	ML003, Outer Grate, Desgaste	1	2.6	2.6	3%	86%
6	ML001, Sala Eléctrica, SS200, Ser Drive, Falla de comunicación	3	1.9	0.6	2%	88%
7	ML003, Perno Shell Liner, Rotura	1	1.6	1.6	2%	89%
8	ML003, Sello Chute FE, Atrapamiento de billa	2	1.5	0.7	1%	91%
9	ML001, Malla, Desgaste	1	1.4	1.4	1%	92%
10	ML001, Liner Chute DE, Desgaste	1	1.4	1.4	1%	94%
11	Resto de fallas	10	6.5	6.5	6%	100%

Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

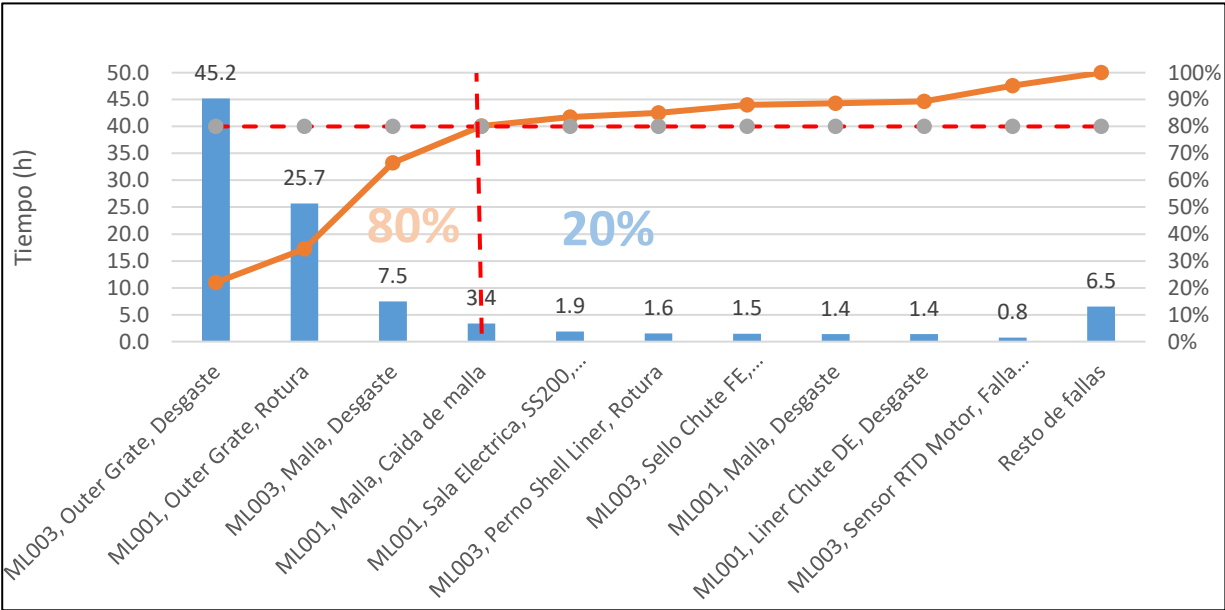
El modo de falla con mayor tiempo asociado se dio en el molino SAG ML003 en la parrilla de la tapa de descarga por desgaste debido al impacto y la fricción de la carga con una duración total de 45.2 horas que representa el 46% del tiempo total del mantenimiento correctivo realizado, lo que indica que es un problema crónico que requiere atención prioritaria. Por otro lado, en el molino SAG ML001 se presenta una falla también en la parrilla de la tapa de descarga, pero por

rotura, siendo la causa principal el impacto del material con 25.7 horas de duración total y un 26% de frecuencia, siendo significativo para reducir el tiempo de inactividad.

Los modos de falla en los molinos ML001 y ML003 por el desgaste y caída de malla de trommel, tuvieron menor impacto. Sin embargo, son importantes para determinar el tamaño de las partículas que se retiran o continúan en el proceso de molienda según su granulometría. Del mismo modo, el desgaste de la malla, aunque se clasifique como un impacto menor, puede alterar la eficiencia de la clasificación del material, provocando que partículas no deseadas sigan en el proceso o que el material valioso sea eliminado prematuramente. Si no se aborda adecuadamente, este tipo de falla podría genera problemas más graves en el rendimiento de la planta, afectando la caída del producto final y aumentando los costos operativos.

Figura 13

Pareto de duración por modo de falla año 2022

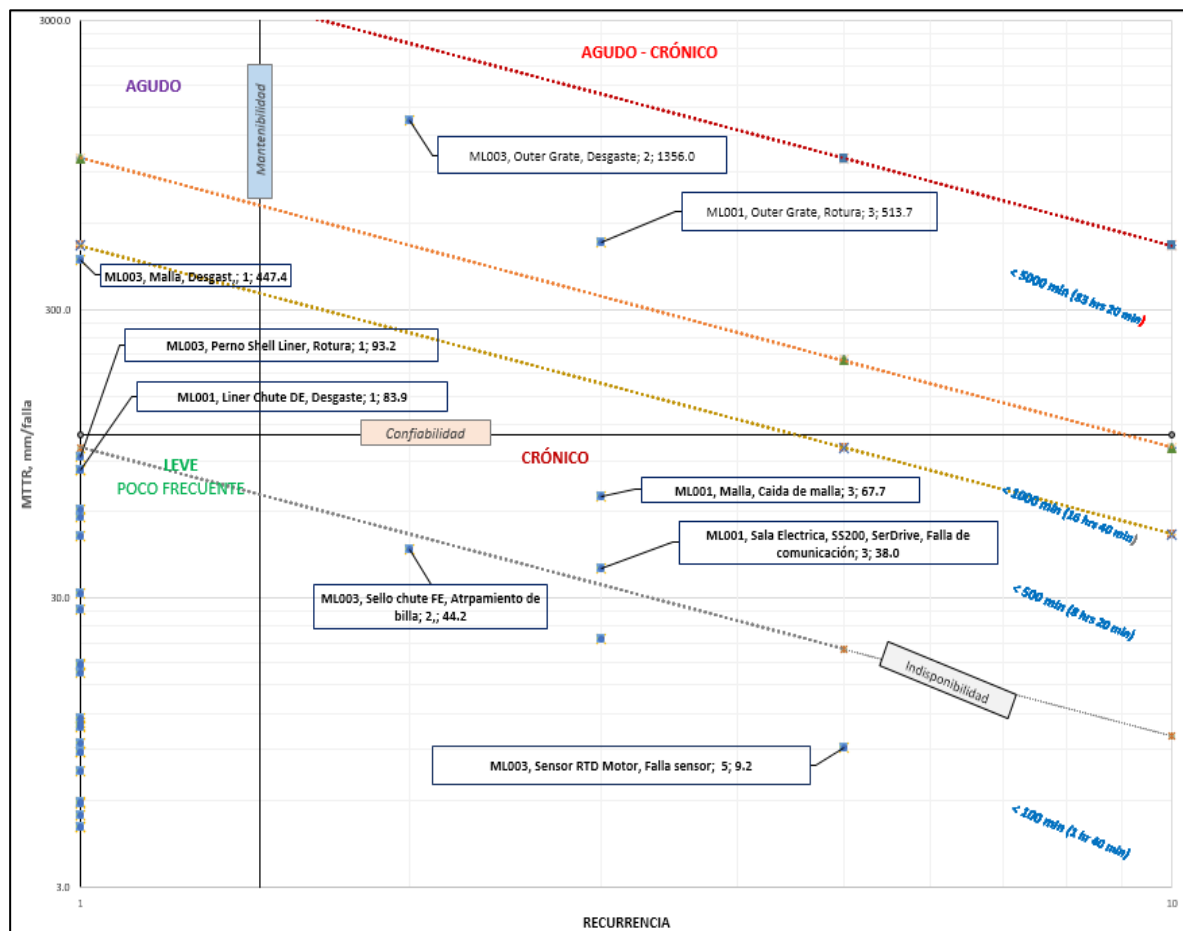


Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Según el análisis presentado, los dos modos de falla mas significativos de los molinos ML003 y ML001 (desgaste y rotura de parrillas de la tapa de descarga), representan aproximadamente el 72.9% del tiempo total de inactividad. Esto sugiere que una estrategia enfocada en estos modos podría resultar en una mejora considerable en la eficiencia operativa. Por lo que se recomienda prorizar el mantenimiento y la investigación de las causas raíz de estas fallas para reducir su frecuencia y duración.

Figura 14

Jack Knife por modo falla 2022



Nota. Unidad minera Constanca. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Los modos de falla con mayor duración total se dieron en el molino ML003 (Outer grade – desgaste y Mallas de trommel - Caída) y en el molino ML001 (Outer grade – rotura y Mallas de tromell – desgaste), cuya severidad y frecuencia indican que son los principales responsables del tiempo de inactividad. Cabe resaltar que los Outer-grade (parillas) son esenciales para la clasificación y descarga de la pulpa, etapa intermedia antes de la clasificación final, mientras que el desgaste de mallas de tromell afecta en el orden de las partículas en la clasificación y descarga final de la pulpa, estos modos de fallas reducen la eficiencia y calidad de la molienda. Aunque algunos modos de falla tiene menor duración y frecuencia, su impacto sigue siendo relevante para la operación.

En general, según el análisis de datos del año 2022 revela que los modos de falla más significativos son críticos para la operación. La implementación de un enfoque proactivo en el mantenimiento y la capacitación del personal, junto con un análisis continuo de las causas de falla, puede llevar a una mejora sustancial en la disponibilidad operativa y una reducción del tiempo de inactividad.

4.2.2.2 Año 2023.

Tabla 8

Frecuencia y tiempos por modo de falla año 2023

ítem	Evento de Falla	Cantidad	Duración total (h)	MTTR	f	F
1	ML003, Perno Liner Tapa DE, Rotura	3	40.9	13.6	29.50%	30%
2	ML003, Outer Grate, Rotura	8	38.6	4.8	27.90%	57%
3	ML001, Outer Grate, Rotura	6	26.4	4.4	19.10%	77%
4	ML001, Malla, Caída de malla	4	6.4	1.6	4.60%	81%
5	ML001, Sala Eléctrica, SS200, Ser Drive, Terminal defectuoso	6	3.3	0.5	2.40%	84%
6	ML001, Malla, Saturación	2	3	1.5	2.20%	86%
7	ML001, Malla, Configuración	1	2.7	2.7	2.00%	88%
8	ML003, Perno Shell Liner, Rotura	1	2.7	2.7	2.00%	90%
9	ML003, Perno Liner Tapa DE, Soltura	1	2.1	2.1	1.50%	91%
10	ML003, Sello Chute FE, Atrapamiento de billa	2	1.6	0.8	1.20%	92%
11	Resto de fallas	23	10.6	9.6	4%	100%

Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

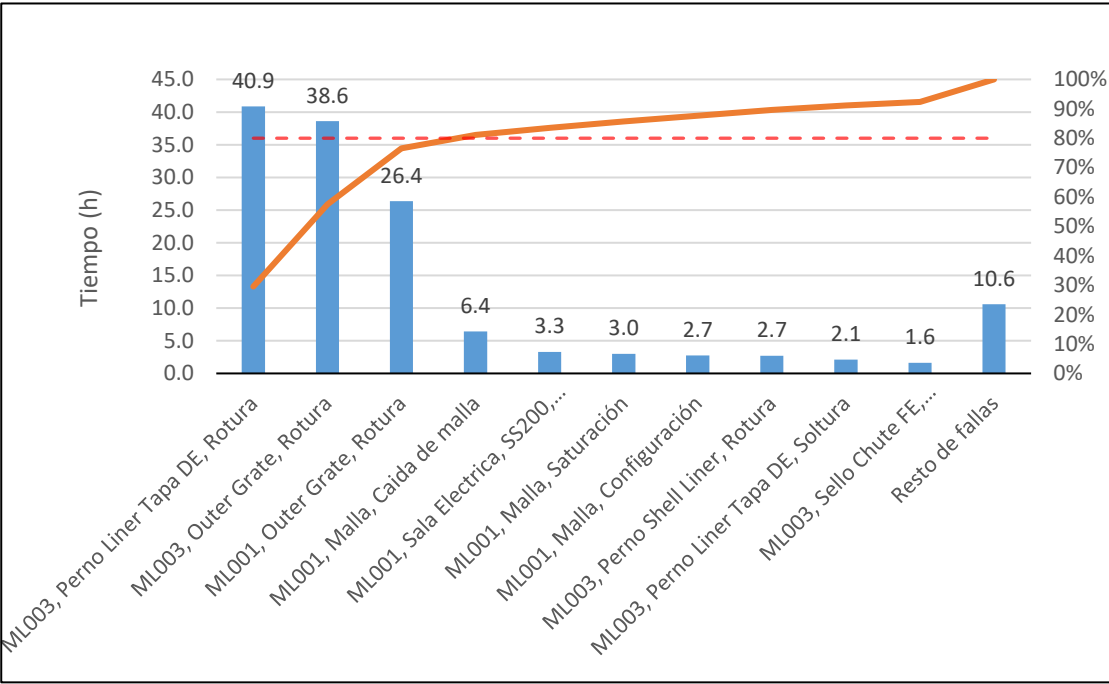
Los eventos de falla críticos se dio en el molino ML003, debido a las roturas de los pernos de los liners y de la rotura de las parrillas en la tapa de descarga, ya que al no mantener en su lugar los liners del molino, pone riesgo la integridad estructural del equipo (casco –tapas). Por lo que interrumpe su funcionamiento causando paradas frecuentes y prolongadas para realizar reparaciones o reemplazos. Debido a su recurrencia en el año 2023, estos eventos deben recibir atención prioritaria.

Por otro lado, los eventos de falla que se dieron en el molino SAG ML001 con las parrillas por rotura y en caídas de mallas de tromell, aunque son de menor impacto, se muestran

repetitivas considerando el año 2022, por lo requieren gestionar su monitoreo frecuente para que no evolucione en fallas mayores.

Figura 15

Pareto de duración por modo de falla, año 2023

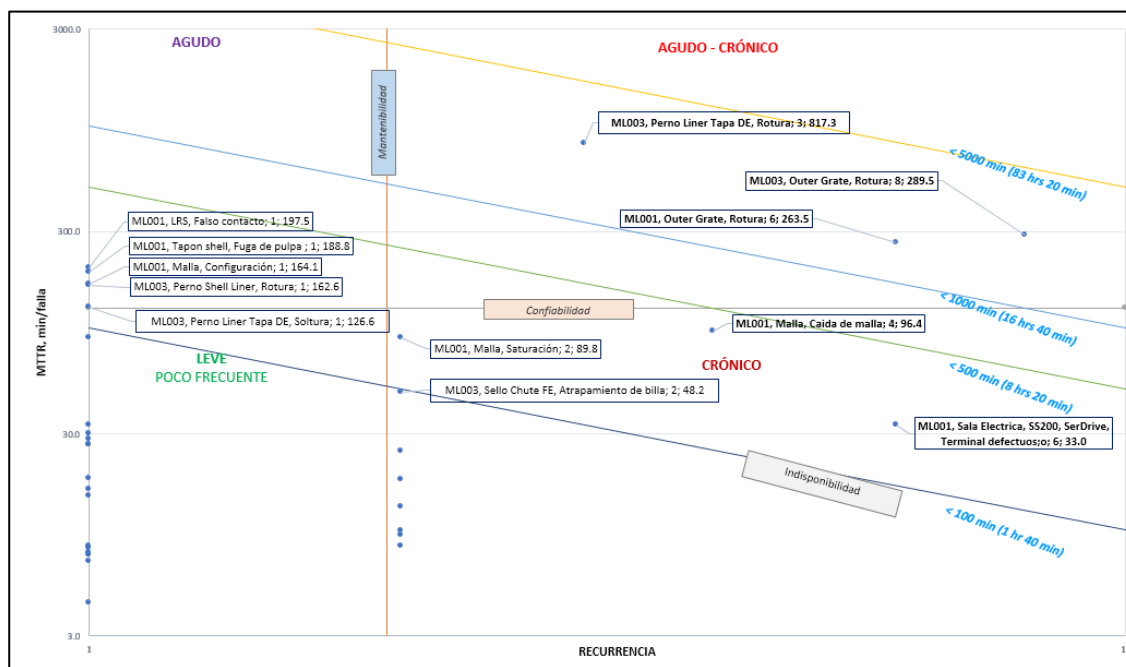


Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Según el análisis obtenido, los dos modos de falla más significativos se dan en ambos molinos (ML003 y ML001) representando aproximadamente el 87% del tiempo total de inactividad. Esto sugiere que una estrategia enfocada en estos modos podría resultar en una mejora considerable en la eficiencia operativa.

Figura 16

Jack Knife por modo falla 2023



Nota. Unidad minera Constanca. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Los modos de falla con mayor duración total, ocurridos en los molinos SAG ML001 y ML003, deben ser el enfoque principal debido a su alta severidad y frecuencia, lo que los convierte en los principales responsables del tiempo de inactividad de los molinos. La presencia de estos fallos recurrentes resalta la importancia de priorizar su atención para mejorar la eficiencia operativa y reducir paradas no planificadas. Mientras tanto, las fallas de menor severidad, como la saturación de la malla y problemas en el sistema eléctrico relacionado con el variador de frecuencia SS200, aunque presentan menor duración y frecuencia, tienen un impacto significativo en la estabilidad y el rendimiento global de la planta si no se gestionan adecuadamente.

En conjunto, el análisis de datos de 2023 subraya la necesidad de un enfoque exhaustivo para abordar las causas subyacentes de estas fallas, optimizando tanto las estrategias de mantenimiento como la capacitación del personal para mantener la continuidad operativa.

4.2.2.3 Año 2024.

Tabla 9

Frecuencia y tiempos por modo de falla año 2024

Nro.	Evento de falla	Cantidad	Duración total (h)	MTRR	f	F
1	ML001, Caída de mallas	10	68.1	6.8	41%	41%
2	ML003, Caída de mallas	5	28.6	5.7	17%	59%
3	ML003, Pernos rotos iner pulp lifter	1	6.7	6.7	4%	83%
4	ML001, Pernos de parrilla Rotos	2	5.1	2.6	3%	90%
5	ML003, Ser Drive	12	3.1	0.3	2%	91%
6	ML001 Falla eléctrica	1	2.3	2.3	1%	94%
7	ML003, Inspección de liners del molino	1	1.7	1.7	1%	95%
8	ML001, Delta Piñón	1	1.5	1.5	1%	96%
9	ML001, Baja presión y flujo de la bomba PU54	1	1.3	1.3	1%	98%
10	ML001, Ser Drive	1	1.1	1.1	1%	99%
11	ML003, Ajuste de Sello de Contra eje	1	0.9	0.9	1%	100%

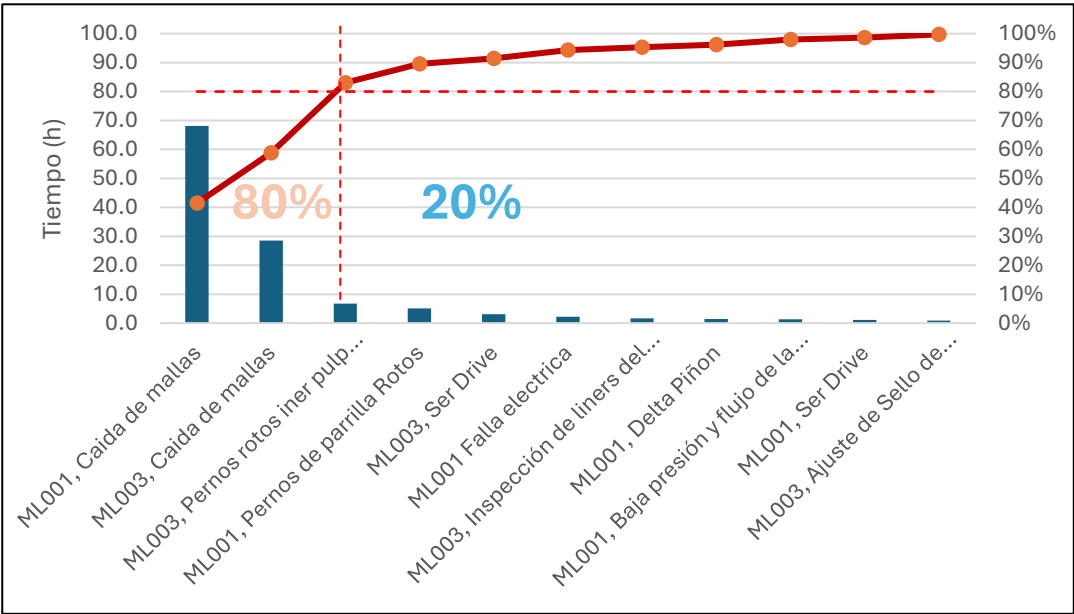
Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Los eventos de falla críticos se dan en los molinos SAG ML001 y ML003 por las caídas de mallas, generando gran parte de inactividad en la planta, siendo necesario su monitoreo y mantenimiento preventivo para evitar ocurrencias continuas, debido a que es un problema que viene de los años atrás analizados.

Por otro lado, los eventos menos críticos son en el molino ML003 por pernos rotos en el iner Pulp lifter y en el molino ML001 por pernos rotos en la parrilla, los cuales son importantes para el transporte del material triturado hacia la descarga generando una inestabilidad en el equipo y posibilidad de obstrucciones, por lo que se sugiere inspecciones periódicas para el reemplazo de las piezas y reparaciones correspondientes, ya que esto generará paradas de planta y pérdidas de producción, lo cual si se planifica no puede llegar a ser grave ya que optimizaría mejor los tiempo de trabajo estando preparados ante la circunstancia.

Figura 17

Pareto de duración por modo de falla, año 2024



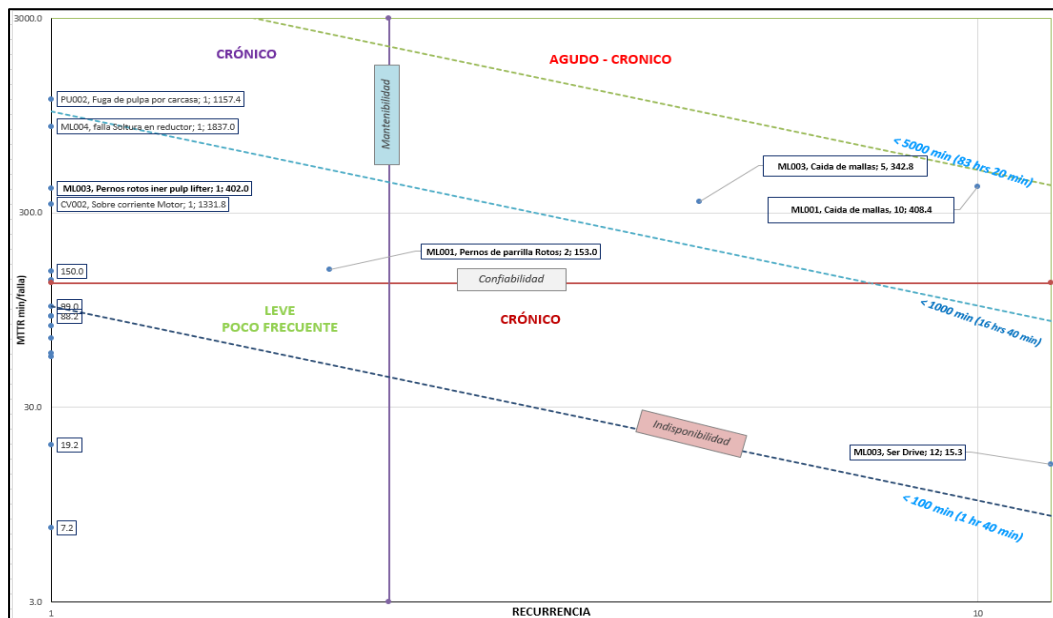
Nota. Unidad minera Constanca. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

El gráfico sugiere que los eventos de falla más críticos, como la caída de mallas (ML001) y caída de mallas (ML003), son responsables de la mayor parte del tiempo de inactividad, representando más del 80% del tiempo total, lo cual es una señal clara de que estos problemas deben ser la prioridad en los esfuerzos de mantenimiento para el año 2024.

Para los siguientes años es fundamental centrarse en la prevención de estos fallos recurrentes, dado que se presentan con alta frecuencia y duración. Se debe establecer estrategias de mantenimiento que minimicen las paradas imprevistas, enfocándose en estos problemas predominantes. En cuanto a los eventos de menor frecuencia, es necesario el monitoreo continuo bajo un enfoque de mantenimiento predictivo y proactivo.

Figura 18

Jack Knife por modo falla 2024



Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.


Según el análisis del 2024 resalta que aún persisten los fallos en los molinos SAG ML001 y ML003 por caída de mallas, generando graves paradas de planta y distorsiones a la máquina. Pues se tienen que hacer adaptaciones para su funcionamiento y así disminuir el deterioro de las piezas a largo plazo. Se requiere replantear los procesos de mantenimiento y verificar el historial pasado para determinar el origen de las fallas.

De los diagramas mostrados se identifican las fallas críticas y agudas que han ocurrido en los molinos SAG en el período 2022-2024, modos de fallas que se tienen que analizar bajo el enfoque ACR.

Tabla 10

Resumen de fallas críticas y agudas en los molinos SAG, 2022- 2024

ítem	Evento de Falla	Cantidad
Año 2022		
1	ML003, Perno Liner Tapa DE, Rotura	2
2	ML003, Outer Grate, Rotura	3
3	ML001, Outer Grate, Rotura	1
4	ML001, Malla, Caída de malla	3
Año 2023		
1	ML003, Perno Liner Tapa DE, Rotura	3
2	ML003, Outer Grate, Rotura	8
3	ML001, Outer Grate, Rotura	6
4	ML001, Malla, Caída de malla	4
Año 2024		
1	ML001, Caída de mallas	10
2	ML003, Caída de mallas	5
3	ML003, Pernos rotos iner pulp lifter	1



ítem	Evento de Falla	Cantidad
1	Caída de mallas tromell	22
2	Rotura de Outer Grade	18
3	Rotura de pernos de liners	6

Nota. Elaboración propia.

4.3 Análisis causa - raíz

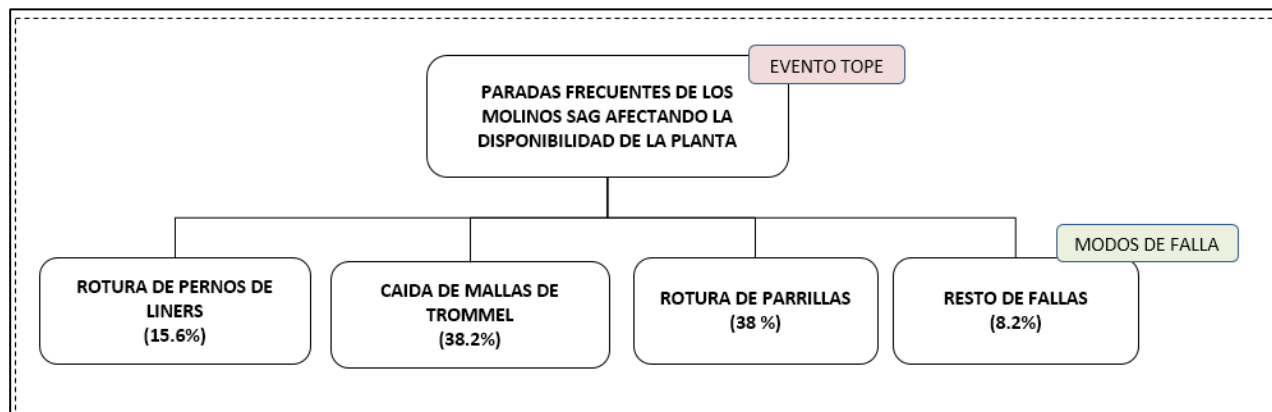
Se realiza el análisis de causa raíz a los modos de fallas crónicos y agudos, empleando la técnica del árbol lógico de fallas, para encontrar y plantear acciones correctivas a los factores causales de estos modos de falla.

4.3.1 Árbol lógico de fallas

Se muestra la caja principal del análisis definiendo el evento tope, razón por la que se realiza dicho estudio; así también, los modos de falla con el porcentaje de incidencia de cada evento en la pérdida de la disponibilidad de la planta.

Figura 19

Caja principal del árbol lógico de fallas de los molinos SAG

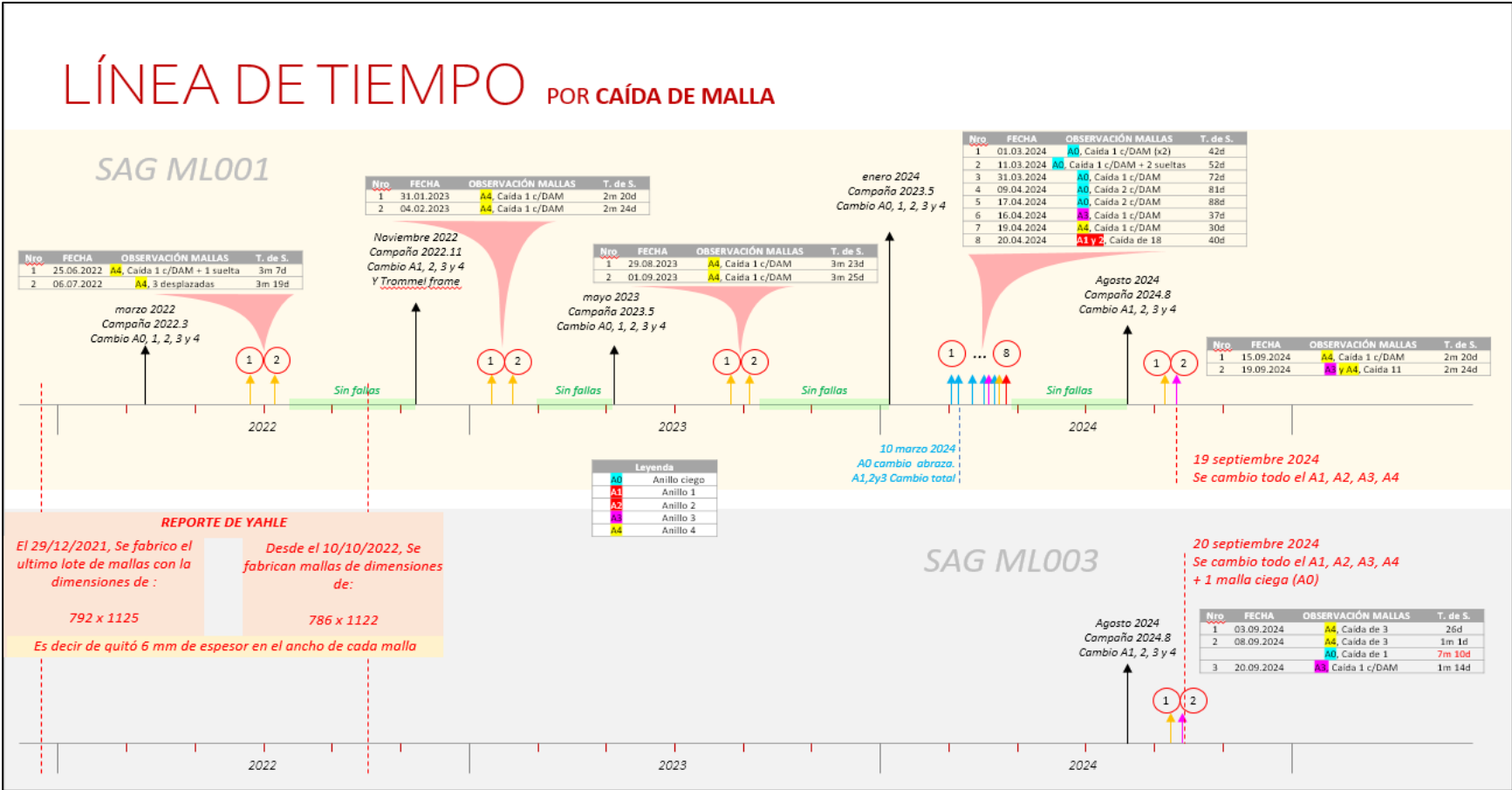


Nota. Elaboración propia.

La caída de mallas de trommel con 38,2% de incidencia, es el modo de falla que mayor impacto ha tenido durante el periodo 2022-2004, debido a ello es prioritario desarrollar el análisis ACR para corregir y mitigar los efectos de este evento. Con la información presentada en la **figura 20**, línea de tiempo de las caídas de mallas, y las evidencias mostradas en la **tabla 10** se validan las hipótesis de las causas físicas y se completa el árbol lógico (Véase **figura 21**) para el análisis correspondiente de los planes de acción (Véase **tabla 11**).

Figura 20

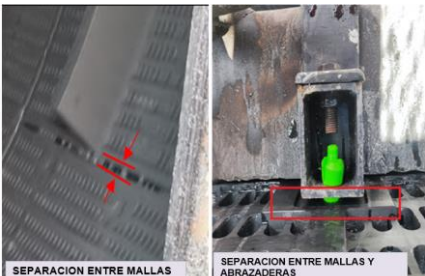



Línea de tiempo de caída de mallas periodo 2022-2024



Nota. Unidad minera Constanca. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Tabla 11

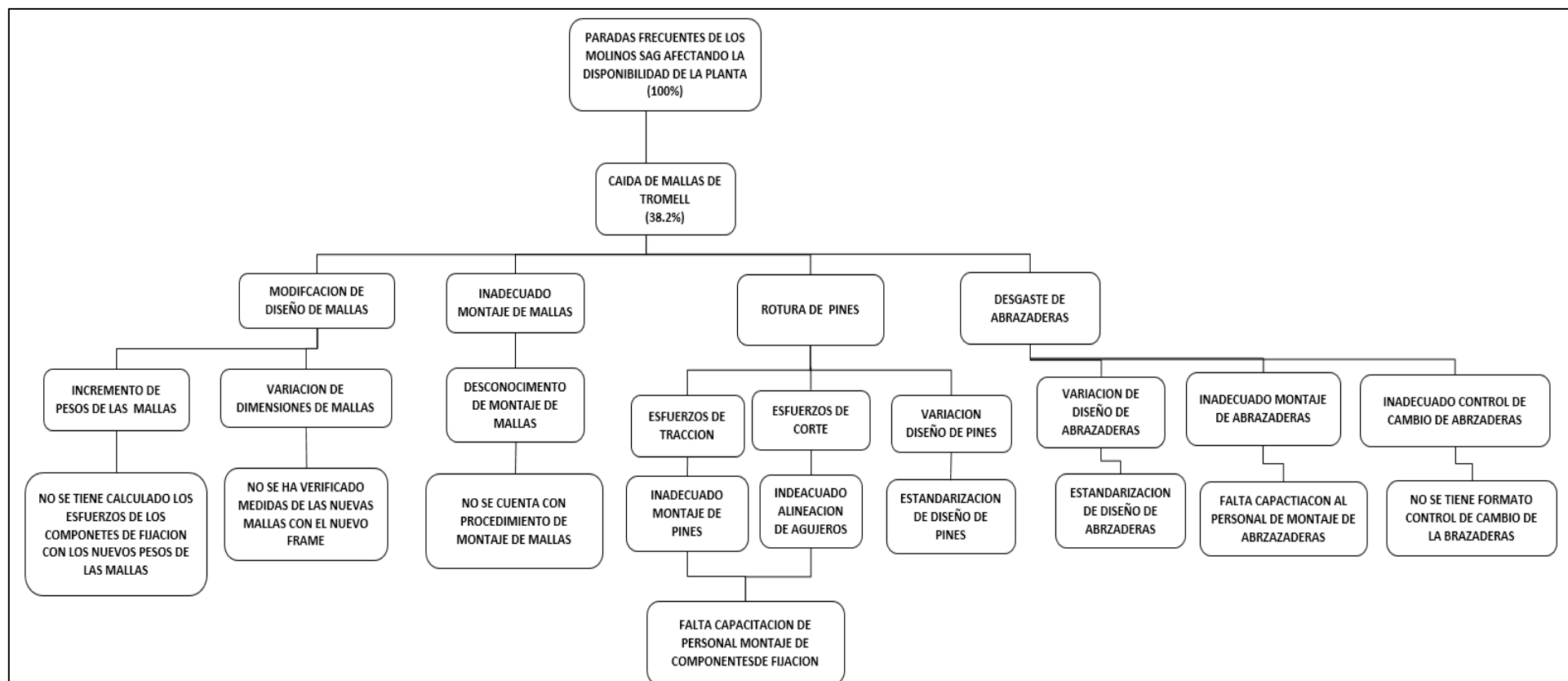
Evidencias de las fallas

EVENTO	HIPOTESIS	EVIDENCIAS	REGISTRO
Caída de mallas de trommel	Diseño de mallas	<ul style="list-style-type: none"> De la línea de tiempo, el año 2022 hubo una modificación en las dimensiones de las mallas, de 792x1225 mm a 786X1222 mm, se redujo el ancho de las mallas en 6 mm. Se han incrementado el espesor y peso de las mallas de tromell. Se cambió el frame (armazón) del trommel, ocasionado que las abrazaderas queden sueltas después del montaje. Se evidencia separación entre mallas hasta de 18 mm. Se observa separación entre las abrazaderas y la zona de asentamiento de las mallas hasta 12 mm 	
	Montaje de mallas	<ul style="list-style-type: none"> Las mallas no están alineadas ni centradas respecto de las abrazaderas, forzando la instalación de los pines 	
	Rotura de Pines	<ul style="list-style-type: none"> Se encontraron las camisas y pines fracturados y con desgaste. Se observa los pines sometidos esfuerzos de corte. Se evidencia pines con diferentes características de diferentes proveedores. 	
	Desgaste de abrazaderas	<ul style="list-style-type: none"> Se encontraron las abrazaderas con los agujeros desgastados. Se encontraron abrazaderas sueltas con pernos rotos. Se evidencia abrazaderas de diferentes proveedores. (abrazaderas metálicas con revestimiento y sin revestimiento de caucho) 	

Nota. Elaboración propia.

Figura 21

Árbol lógico de fallas – Caída de mallas de trommel



Nota. Elaboración propia.

4.4 Planes de acción

Tabla 12

Planes de acción – caída de mallas de trommel

ITEM	PLANES DE ACCION	CAUSA RAIZ	RESPONSABLE	ESTATUS
1	Solicitar al proveedor la simulación de esfuerzos de los componentes de fijación y armazón, debido al incremento de los pesos de las mallas	No se tiene calculado los esfuerzos de los componentes de fijación con los nuevos pesos de las mallas	Proveedor	El proveedor ha realizado el cálculo de esfuerzos para ver la capacidad de los pines
2	Verificar medidas de los nuevos frame instalados en ambos molinos con la variación de dimensiones de las mallas.	No se ha verificado las medidas de las nuevas mallas con los nuevos frame instalados	Proveedor	El proveedor ha escaneado los componentes del tromell, para corregir espacios existentes en los componentes después del montaje (resultados en proceso)
3	Se debe elaborar y difundir el procedimiento y/o instructivo de montaje de mallas con las consideraciones técnicas y de seguridad	No se cuenta con procedimiento de montaje de mallas	Área de ejecución	Se ha elaborado un estándar y procedimiento para el cambio de mallas de tromell
4	Capacitar al personal en el montaje de componentes de fijación de las mallas	Falta capacitación en el montaje de pines	Área de ejecución	Se ha realizado la capacitación en el procedimiento de montaje de mallas
5	Estandarizar el diseño de los pines	Falta estandarización del diseño de los pines	Área de confiabilidad y planeamiento	Se ha eliminado los diferentes pines Se tiene pines mejorados de un solo proveedor
6	Estandarizar el diseño de las abrazaderas	Falta estandarización del diseño de las abrazaderas	Área de confiabilidad y planeamiento	Se ha eliminado las diferentes abrazaderas. Se tiene abrazaderas mejoradas de un solo proveedor.
7	Capacitar al personal en el montaje de componentes de fijación de las mallas	Falta capacitación en el montaje de las abrazaderas	Área de ejecución	Se ha realizado la capacitación en el procedimiento de montaje de mallas.
8	Elaborar formato para el control de cambio de abrazaderas	No se tiene formato de control de cambios de las abrazaderas	Área de confiabilidad	Se ha elaborado formato de control de cambios.

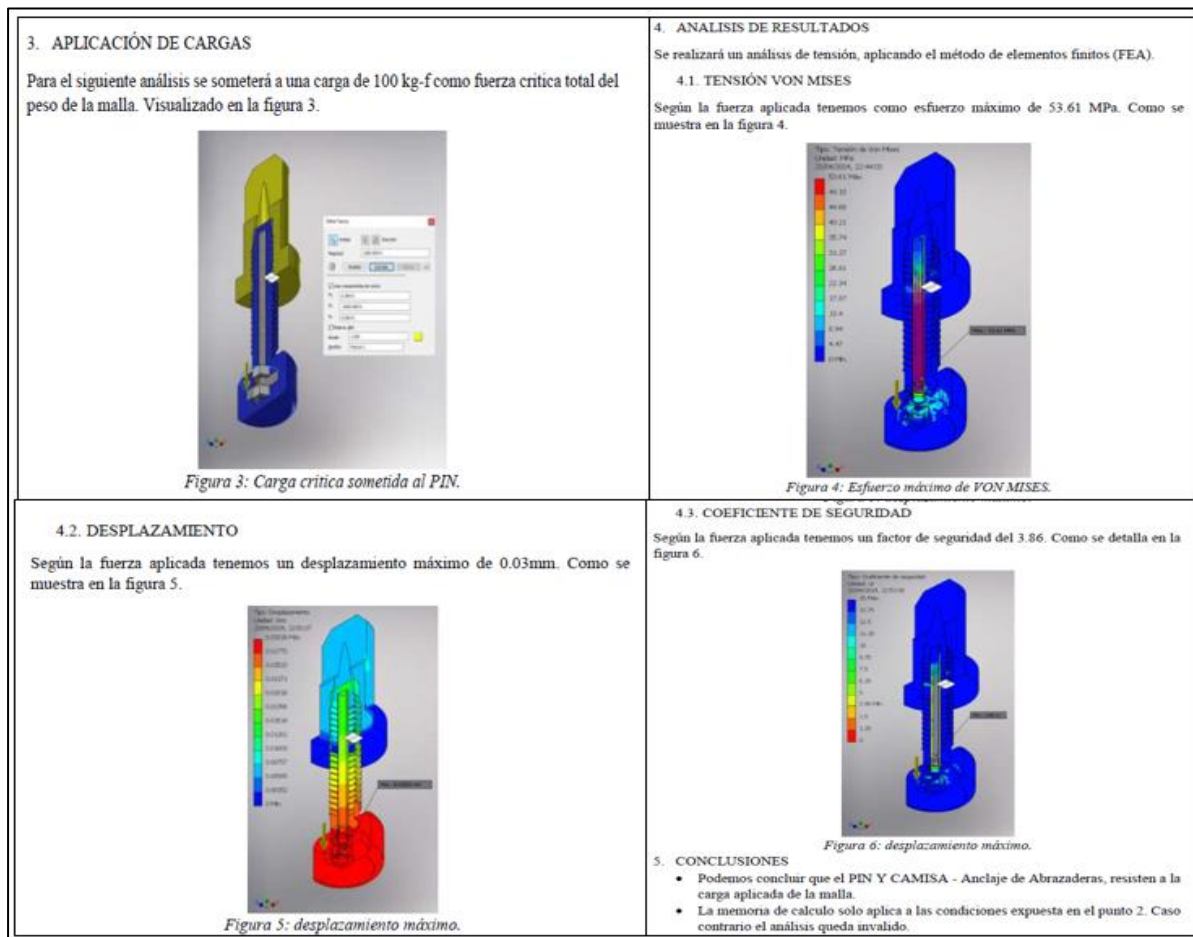
Nota. Elaboración propia.

Los planes de acción detallados en la **tabla 12** abordan de manera sistemática las causas raíces identificadas las cuales están relacionadas con la caída de las mallas en los trommels de los molinos SAG. Por lo que cada acción está diseñada para mitigar riesgos y mejorar la disponibilidad operativa de los molinos. Asimismo, la colaboración con los proveedores es crucial, especialmente en la verificación de medidas y simulaciones de esfuerzos, lo que garantiza que los componentes estén diseñados para soportar las cargas aplicadas.

Por otro lado, la capacitación del personal y la estandarización de componentes son estrategias clave para asegurar un montaje adecuado y minimizar errores, pues la implementación de un procedimiento estandarizado para el montaje de las mallas, junto con el desarrollo de un formato de control para cambios de abrazaderas, proporciona un marco claro que facilita la gestión de mantenimiento y mejora la confiabilidad de los sistemas. En conjunto, estas acciones están orientadas a crear un entorno operativa más eficiente y seguro, contribuyendo al rendimiento y sostenibilidad de la unidad minera.

Figura 22

Cálculo de esfuerzos de los pines – caída de mallas



Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Se ha realizado un análisis utilizando el método de elementos finitos (FEA), que permite visualizar como las cargas aplicadas afectan a los pines y al armazón del trommel. De este modo, los resultados muestran un esfuerzo máximo de 53.61 MPa, lo que indica que, bajo las condiciones actuales, los componentes están dentro de los límites establecidos de seguridad. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos cálculos se basan en la carga crítica de 100 kg-f, correspondiente al peso total de la malla.

Además, presenta un desplazamiento máximo de 0.03 mm, valor aceptable, pero en base a ser monitoreado continuamente durante la operación, también la implementación de un factor de seguridad de 3.86 refuerza la necesidad de mantener un control riguroso sobre las condiciones de operación, garantizando así la integridad estructural y funcional del sistema.

4.5 Disponibilidad

De la tabla 10, se resumen los 3 modos de falla con mayores tiempos asociados, calculando el efecto que cada uno de estos eventos ha tenido en la disponibilidad de la planta, en el periodo de estudio (Véase **tabla 13**), que son las fallas que en conjunto tienen un impacto de 1.24% por año en la disponibilidad.

Tabla 13

Impacto en la disponibilidad por modos de falla

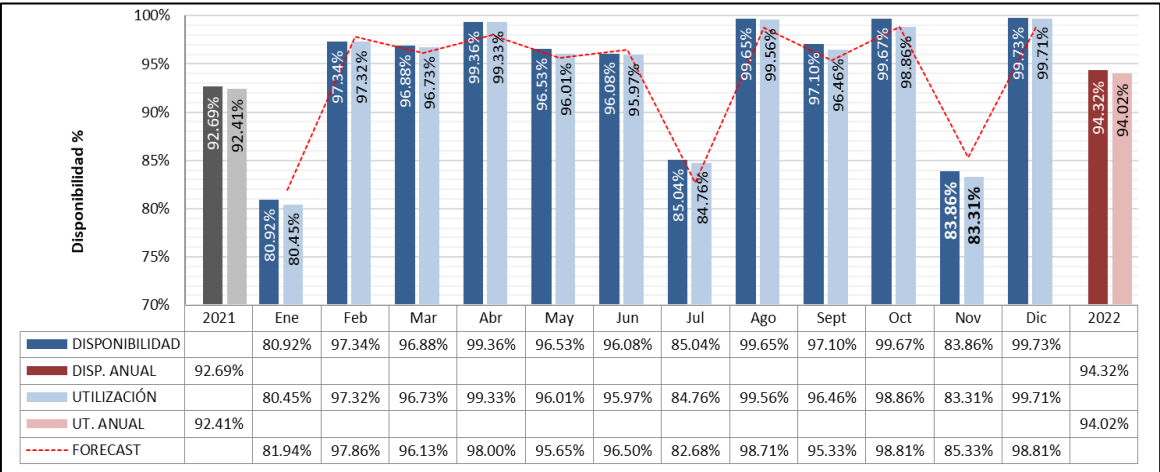
ítem	Evento de Falla	Tiempo total (h)	Indisponibilidad (promedio x año)
1	Caída de mallas tromell	136.3	0.52%
2	Rotura de Outer Grade	135.9	0.21%
3	Rotura de pernos de liners	50.8	0.51%

Nota. Elaboración propia

A continuación, se presenta la disponibilidad calculada de los años 2022, 2023 y hasta el mes de septiembre del 2024.

Figura 23

Disponibilidad y Utilización de Planta 2022

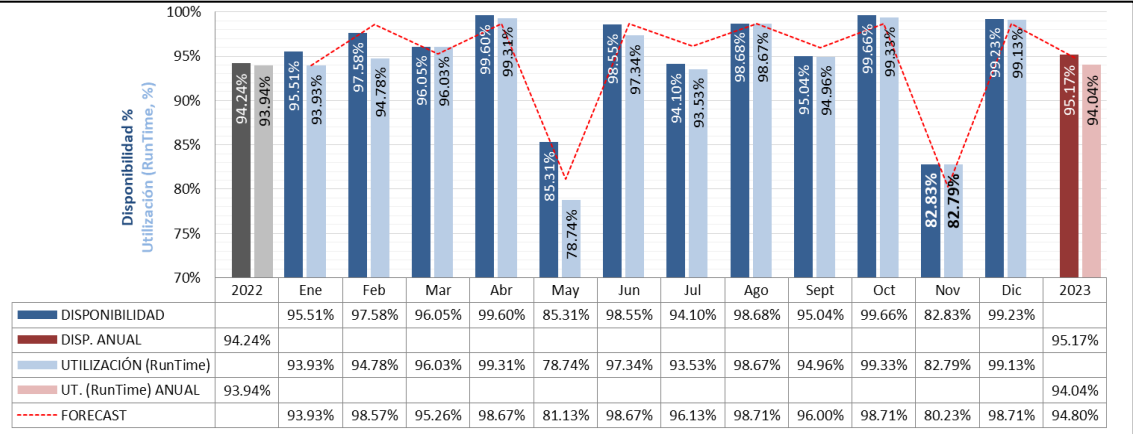


Nota. Unidad minera Constanca. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

En el año 2022 se observa que en los meses de enero, febrero, mayo y noviembre no se cumplió con la disponibilidad proyectada fluctuando entre un 80.45% y un 99.73%, lo que sugiere variaciones significativas en el rendimiento operativo, relacionado con paradas no programadas o problemas de mantenimiento.

Figura 24

Disponibilidad y Utilización de Planta 2023

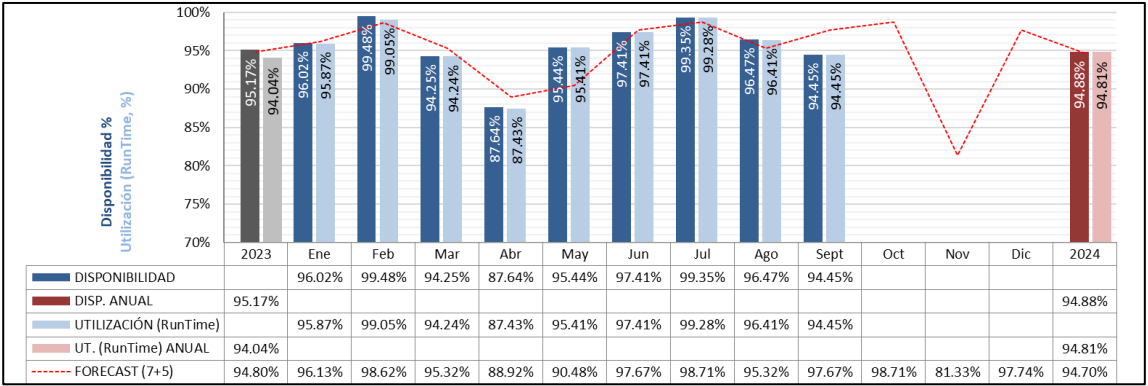


Nota. Unidad minera Constanca. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

En el año 2023 se observa que en los meses de febrero, junio, julio y septiembre no se cumplió con la disponibilidad proyectada, oscilando entre el 78.74% y el 99.60%; sin embargo, la tendencia general muestra un aumento en la disponibilidad hacia el final del período.

Figura 25

Disponibilidad y Utilización de Planta 2024



Nota. Unidad minera Constanica. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

En el año 2024 se observa que en los meses de febrero, marzo, abril, junio y septiembre no se cumplió con la disponibilidad proyectada, variando entre el 87.43% y el 99.48%, hasta este período ya se están implementando medidas efectivas para mantener la disponibilidad dentro de los rangos aceptables, alcanzando niveles óptimos de eficiencia.

CAPÍTULO V. Discusión de resultados

En esta parte se lleva a cabo un examen minucioso de los resultados alcanzados a partir de distintos temas abordados en las secciones previas del trabajo, con el propósito de comprender los elementos que inciden en la disponibilidad, confiabilidad y eficacia operativa de la planta minera. A continuación, se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los aspectos trabajados.

5.1 Definición de funciones

Con el objetivo de definir las funciones de los molinos SAG, se ha establecido el contexto operacional descrito en el ítem 4.1, recogiendo y actualizando información relacionado con la taxonomía, parámetros operativos, diagramas de bloques, diagramas de flujo y diagramas EPS así como la descripción de los requerimientos actuales de la operación para estos equipos; con ello se ha definido (Véase la tabla 2) la función principal del equipo y las funciones de los componentes (Véase la tabla 3) que las podemos asociar y establecer como las funciones secundarias que tiene que cumplir los molinos SAG. En este contexto, esta definición de funciones es la base para establecer los modos de fallas analizados durante el periodo de estudio. Asimismo, el estudio dado por Viña (2019) también desarrolla el contexto operacional (presenta ficha técnica, taxonomía del equipo y la descripción de los sistemas principales de las palas); sin embargo, no llega a definir las funciones del equipo. De este modo, esta descripción de funciones nos brinda la claridad para abordar el análisis de fallas, pues nos da las exigencias que cada componente contribuye para el rendimiento global de los molinos SAG. Tal es así que quedo establecido las funciones del trómel y liners componentes de los molinos implicados en este estudio.

5.2 Jerarquización de activos y modos de falla

En el desarrollo de la jerarquización de activos realizado para el circuito de molienda se obtuvo que el 5,1 % de equipos (8 unidades) son de alta criticidad entre ellos los molinos SAG, que son el objeto de este estudio, por lo que estos resultados direccionan y ponen en el centro de atención del área de mantenimiento a los dos molinos SAG que se tiene en la planta (ML001 – ML003). Asimismo, como se observa en el trabajo realizado por Cancino (2022), esta estrategia de jerarquización ayuda a focalizar los esfuerzos de mantenimiento en los equipos más críticos de la planta, por lo que los resultados del análisis de criticidad realizado delimitan también la estrategia de mantenimiento a seguir (ver anexo 9), el cual señala realizar el análisis de causa raíz como una metodología indicada para controlar las fallas en este tipo activos.

Por otro lado, los análisis de Pareto y Jack Knife realizados para la clasificación de los modos de fallas de los molinos SAG durante el período 2022-2204, se obtuvo que 3 fallas generan mayores pérdidas de disponibilidad, como se muestran en las tablas 10 y 13; siendo la caída de mallas de trommel, la rotura de parillas y la rotura de pernos de los liners del molino; además, por su naturaleza (recurrencia vs tiempo de parada) se consideran fallas crónicas y agudas como se muestra en la diagramas de Jack Kinfe de la figuras 14, 16 y 18.

Estas técnicas empleadas por Cancino (2022) y Zabala (2022), nos muestran que son de bastante utilidad para la toma decisiones y que ayudan a priorizar los modos de fallas a analizar y solucionar. En tal sentido, de los resultados obtenidos centramos nuestros esfuerzos en el modo de falla, que es la caída de mallas de trommel para realizar el análisis correspondiente.

5.3 Análisis causa – raíz

Se realizó el análisis de causa raíz a los modos de fallas de mayor criticidad que impactaron en la disponibilidad de la planta. En el estudio se halló que el tiempo de paradas por caída de las mallas de trommel constituyo el 38.2% del total tiempo del mantenimiento correctivo ejecutado durante el período 2022-2024. Siendo este modo de falla el de mayor relevancia, se

estableció como objetivo para el análisis correspondiente, utilizando la metodología del árbol lógico de fallas para establecer detalladamente las causas de los fallos y sugerir medidas correctivas concretas. El diagrama de árbol de fallas ha facilitado la identificación de las diversas causas fundamentales relacionadas con la caída de las mallas de trommel, 8 causas en total, cuya combinación influyen en la ocurrencia de estos eventos. Al igual que el estudio planteado por Cancino (2022), se pudo llegar hasta las causas latentes (causas organizacionales), que constituyen deficiencias en procedimientos, estandarización de repuestos y cálculo de desempeño de los componentes.

Para mayor entendimiento se detalla a continuación:

Diseño de las mallas de trommel: Se ha constatado que en el año 2022 se realizaron ajustes en las dimensiones de las mallas, pasando de 792x1225 mm a 786x1222 mm, lo que ocasionó una disminución en el ancho de las mallas de 6 mm. Además, de aumentar la densidad y la masa de las redes sin llevar a cabo una evaluación adecuada de las esfuerzos en los elementos de sujeción y la estructura. Esta alteración provocó un incremento de la carga sobre los componentes, lo cual aumentó la probabilidad de que ocurrieran fallos. Por otro lado, se modificaron los armazones del trommel, provocando que las abrazaderas quedarán flojas tras el ensamblaje, siendo un factor determinante para el desprendimiento de las mallas.

Instalación de las mallas de trommel: Se observó que las mallas no estaban correctamente alineadas ni centradas con las abrazaderas, lo que requirió la instalación forzada de los pines, resultando en su rotura. Esta falta contribuyó al desgaste prematuro de las piezas implicadas.

Daño en los pines y deterioro de las abrazaderas: Se observó que los pernos mostraban fracturas y desgaste, lo cual se relacionó con los esfuerzos de corte a los que estaban expuestos durante la operación. Adicionalmente, se encontraron abrazaderas con agujeros desgastados y sueltos, lo cual empeoró la situación. Cabe resaltar que se tuvo una diversidad de

pinos y sujetadores procedentes de varios proveedores y no estando normalizados, generando irregularidades.

5.4 Planes de acción

El objetivo de encontrar los factores causales de los modos de fallas fue la de establecer e implementar acciones que mitiguen o eliminen el impacto de estos eventos, en tal sentido para el modo de falla analizado, la caída de mallas de tromell, se establecieron también 8 acciones correctivas en correlación a cada una de las causas raíz encontradas en el árbol de fallas. Los planes de acción implementados son de diferente índole como se puede ver también en el estudio realizado por Viña (2019), donde presenta mejoras en el plan de mantenimiento del equipo (inspecciones, regulaciones, cambios periódicos de componentes), esta etapa del estudio no acaba con la listado de acciones correctivas, sino que se debe hacer seguimiento a lo largo de un período para ver la efectividad de los mismos; en este caso analizado, en la unidad minera constancia se viene implementado de forma paulatina los planes de acción presentados para controlar la caída de mallas. Desde el mes septiembre del año 2024 se ha avanzado con lo siguiente:

- Se elaboró un procedimiento y un análisis estándar para el cambio de las mallas del trommel, la cual nos da las pautas para realizar el trabajo correctamente desde el punto de visto técnico y con seguridad.
- Se realizaron cálculos de esfuerzos de los pines de sujeción con lo cual se determina la confiabilidad de estos componentes.
- Se ha realizado mejoras en los pines y abrazaderas (reforzadas con caucho) que fijan las mallas; además de estandarizar estos componentes.
- Se ha elaborado formatos de control de cambio componentes.

- Se tiene pendiente los resultados del escaneo del framme del trommel y de las mallas, para corregir los espacios existentes entre estos componentes.

5.5 Disponibilidad

En el análisis de fallas realizado para mejorar la disponibilidad de la planta se pudo encontrar que el impacto global de los tres modos de falla identificados como críticos, que no están siendo controlados en los molinos SAG, generan pérdidas de 1.26% en este indicador. Pérdidas cuyo valor es elevado y que se deben mitigar para poder alcanzar la eficiencia operativa, que es el objetivo a largo plazo. De este modo, en el estudio realizado por Viña (2019), también se puede ver que las pérdidas de disponibilidad, generados por las fallas en los componentes del equipo analizado, están alrededor de 1%. En tal sentido, se deduce que identificar los modos de falla y sus factores causales, permiten establecer e implementar planes de acción adecuados. Además, según la naturaleza de los componentes y los modos de falla, es posible optimizar los planes de mantenimiento, mejorar los procedimientos y/o modificar los repuestos para cumplir con las exigencias operativas actuales, lo que a su vez contribuye al incremento de los índices de producción.

Conclusiones

Se identificaron y analizaron los modos de falla con mayor impacto en la disponibilidad de los molinos SAG, destacando la caída de mallas de trommel como la más crítica, representado el 38.2% del tiempo de mantenimiento correctivo, tiempo de 136.3 h que significó 0.56% de pérdidas en la disponibilidad entre los años 2022 y 2024. Asimismo, este estudio permitió establecer acciones correctivas para mitigar sus efectos, lo que contribuye directamente a la mejora de la disponibilidad de la planta, por lo que la implementación y control de la efectividad de estas acciones es esencial para reducir pérdidas operativas y garantizar la eficiencia en la producción dada en la planta.

Se establecieron con precisión las funciones principales y secundarias de los molinos SAG, considerando la taxonomía, los diagramas operativos y los parámetros de funcionamiento. Esta definición permitió comprender el rol de cada componente en el rendimiento global del equipo, lo que facilitó la identificación de modos de falla críticos y orientó la toma de decisiones en mantenimiento. Del mismo modo, la falta de claridad en estos aspectos, como se observó en estudios previos, limitó la efectividad de las estrategias de confiabilidad en otras investigaciones.

Mediante la aplicación de estas metodologías, se determinó que el 5.1% de los equipos del circuito de molienda son de alta criticidad, destacando los molinos SAG como activos estratégicos para la operación. Asimismo, se identificaron tres fallas recurrentes que afectan significativamente la disponibilidad, siendo la caída de mallas de trommel la más relevante, por lo que este enfoque permitió focalizar esfuerzos en los equipos y fallas de mayor impacto, alineando las estrategias de mantenimiento con las necesidades operativas.

La metodología del análisis de causa raíz permitió identificar ocho factores clave en la caída de mallas de trommel, evidenciando deficiencias en el diseño, instalación y estandarización

de componentes. Se concluyó que la falta de normalización en pines y abrazaderas, junto con modificaciones en la estructura del trommel sin evaluación previa, incrementaron la probabilidad de falla. De este modo, este análisis resultó fundamental para el desarrollo de medidas correctivas y la optimización del mantenimiento preventivo.

Se implementaron ocho planes de acción orientados a mitigar las fallas identificadas, incluyendo mejoras en el procedimiento de instalación de mallas, estandarización de repuestos y optimización de los cálculos de esfuerzo en los elementos de sujeción. Es así, como estas acciones han sido implementadas progresivamente desde septiembre de 2024, evidenciando mejoras en la confiabilidad de los molinos SAG, por ello; se recomienda continuar con el monitoreo de los resultados y la evaluación periódica de la efectividad de estas estrategias para garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

Recomendaciones

Se recomienda al área de mantenimiento de la unidad minera Constancia, abordar el análisis, aplicando la misma metodología desarrollada en este trabajo, para los otros dos modos de fallas identificados como críticos, que son la rotura de parrillas y la rotura de pernos de los liners, para con esto lograr incrementos de hasta el 0.72% en la disponibilidad. Del mismo modo, se debe ampliar esta metodología de solución de fallas a los equipos más críticos de la planta.

Se recomienda la revisión y actualización periódica de las funciones de los equipos críticos de la planta contrastando siempre con los requerimientos cambiantes de la operación, por lo que en esta actividad se debe involucrar a las diversas áreas operativas y recabar la opinión de expertos; para con ello el resultado se ajuste de manera más fiel al contexto operativo de la planta, lo que permitirá tener información relevante para realizar cualquier análisis posterior de los equipos.

Para la toma de decisiones del área de mantenimiento es recomendable la previa evaluación de la criticidad de activos y clasificación de modos de falla; para con ello asignar los recursos de manera acertada a los equipos de mayor relevancia para la producción en la unidad minera Constancia. Asimismo, se sugiere realizar la clasificación de fallas de manera continua para el control de la efectividad de las acciones implementadas.

Se sugiere consolidar la metodología del ACR para la gestión de fallas en la unidad minera Constancia, debido a los resultados positivos que trae su aplicación; además que hace que todo personal que participa en el desarrollo de esta metodología incremente su capacidad de análisis y conocimiento sobre el activo, lo que conlleva a mejorar la confiabilidad operacional. Por tanto, para tener mejores resultados esto debe acompañarse de capacitaciones al personal en las diferentes estrategias de mantenimiento.

El control de efectividad de la implementación de los planes de acción debe realizarse después de período de tiempo para validar el análisis desarrollado; caso contrario, volver a replantear el análisis correspondiente.

Bibliografía

- Alberto. (2024). *Máster Logística*. Recuperado de <https://www.masterlogistica.es/diagrama-de-pareto-80-20/>
- Análisis de causa raíz. (2015). Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055980>
- Armas Segura, W. E. (2023). *Evaluación de la puesta en marcha del molino SAG 36'X17' y sistemas auxiliares de la Minera Chinalco Perú – 2023*. Universidad Continental. Recuperado de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13143/1/IV_FIN_109_TSP_Armas_Segura_2023.pdf
- Ávila Da Costa, F., y Martins, L. (2023, mayo). *Análisis de árbol de fallos: definición y aplicación*. Recuperado de <https://blog.infraspeak.com/es/analisis-de-arbol-de-fallos/>
- Cancino Espinoza, L. B. (2022). *Análisis de fallas de una chancadora cónica para mejorar la rentabilidad en una planta de agregados*. Universidad de Ingeniería y Tecnología. Recuperado de https://cris.utec.edu.pe/ws/portalfiles/porta/21870985/Cancino_Espinoza_Tesis.pdf
- García Garrido, S. (2003). *Indicadores de mantenimiento*. Recuperado de <https://www.mantenimientomundial.net/notas/indicadores-en-mantenimiento.pdf>
- Gasca, M. C., Camargo, L. L., y Medina, B. (2020). *Gestión del mantenimiento para la confiabilidad operacional*. Recuperado de <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n47p18>
- HUDBAY. (2021). *Manual de operaciones de planta concentradora*.
- Huerta Mendoza, R. (2000). *El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional*. Ingeniería Mecánica (Vol. 4). Recuperado de <https://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/download/364/704>
- International Organization for Standardization. (2016). *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos*

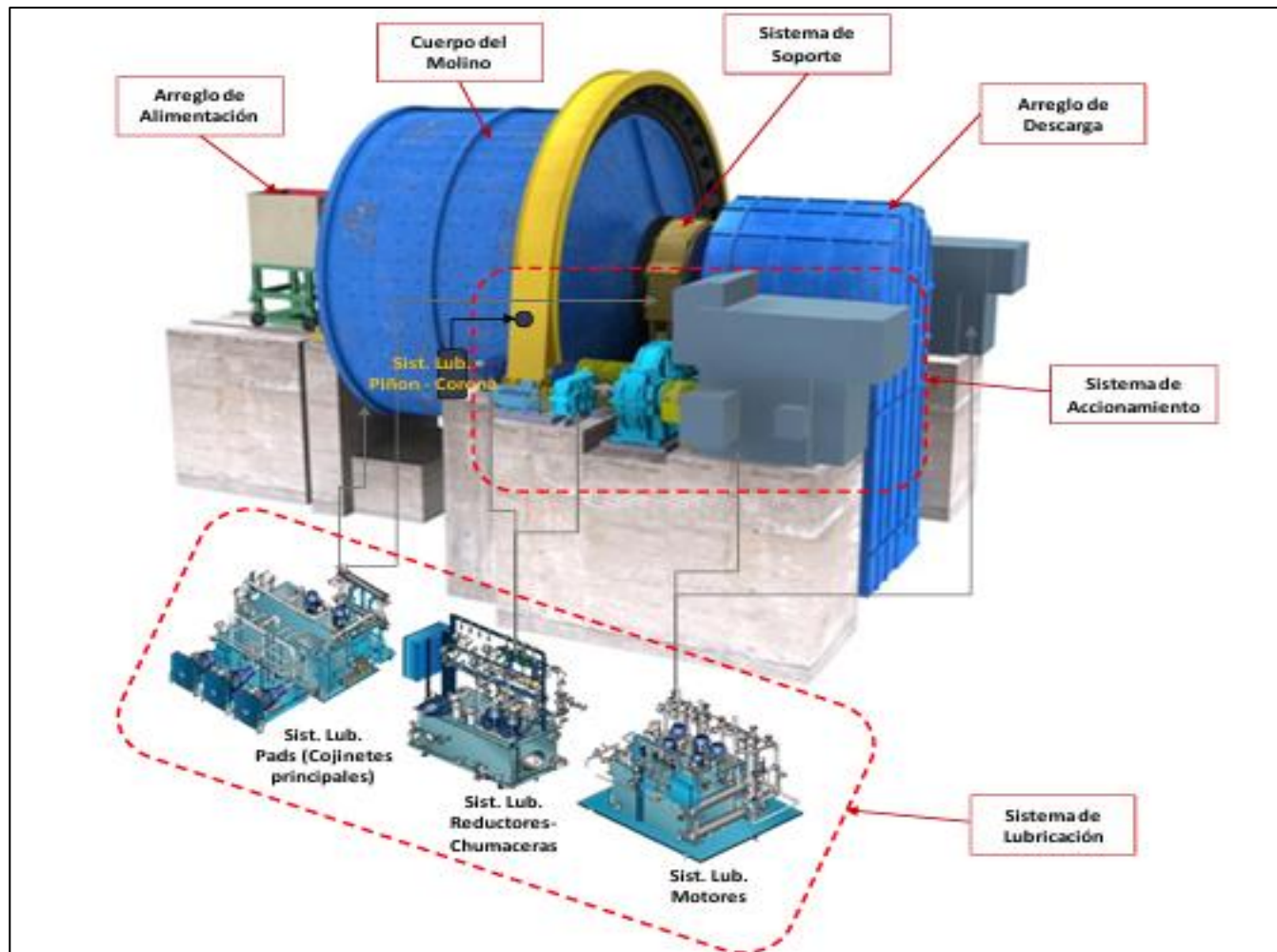
- (ISO 14224:2016). British Standards Institution. Recuperado de https://kupdf.net/download/iso-14224-2016-espaol_5acc2d72e2b6f5570ec619bb_pdf
- Medina, J. (2016, agosto). *RCM PASO 2: FALLOS FUNCIONALES ¿Cuáles son los estados de falla asociados a las funciones?*. Recuperado de <https://confiabilidadrcm.wordpress.com/2016/08/21/paso-2-fallos-funcionales/#:~:text=Fallas%20Cr%C3%ADticas%3A%20Aquellas%20que%20compromet en%20la%20seguridad%2C%20medio,la%20seguridad%2C%20medio%20ambiente%2C %20producci%C3%B3n%20ni%20son%20costosas.>
- Murillo, W. (2020, mayo). *Modelo de Confiabilidad basados en el Análisis de Fallas*. Recuperado de <https://rcmingenieria.com/wp-content/uploads/2021/05/05.-RCA-Modelo-Confiabilidad-basados-en-el-Analisis-de-Falla.pdf>
- Olarte, W., Botero, M., y Cañon, B. (2010). *Importancia del mantenimiento industrial dentro de los procesos de producción*. Scientia Et Technica, 44, 354. Recuperado de <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/h>
- Ortiz, M. del C. (2022, abril). *Administración del mantenimiento*. Recuperado de <https://slidetodoc.com/universidad-cultural-administracin-de-mantenimiento-maestra-ing-mara/>
- Peña Camacho, L. G. (2011). *Diagramas de EPS*. Recuperado de <http://webdelprofesor.ula.ve/forestal/luispc/informatica/uploads/Site/C02.%20Diagramas%20de%20EPS.pdf>
- Rodríguez Joshi, T. (2021). *Metodología de Jack Knife para determinar los niveles de criticidad en sistemas de jumbos Long Hole – Unidad minera Yauliyacu*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7315/T010_70415136_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Rosales, J. (2023, julio). *Disponibilidad y confiabilidad en el mantenimiento*. Recuperado de <https://www.fractal.com/es/mantenipedia/que-es-la-confiabilidad-en-el-mantenimiento-y-como-calcularla>
- SHEN. (2024). *Taxonomía de Equipos - Implementando una identificación correcta de sus activos*. Recuperado de https://www.shenre.cl/shentec/wp-content/uploads/2016/09/15_Br_SHENRE_Taxonomia.pdf
- UNE 13306, Terminología del mantenimiento (2018). Recuperado de <https://studylib.es/doc/9047028/une-13306-2018---terminolog%C3%ADa-del-mantenimiento>
- Venegas Tapia, E. F. (2022). *Análisis de criticidad de activos sector mina para la identificación de equipos críticos en minera Paicaví*. Universidad de Talca. Recuperado de <http://dspace.utalca.cl/bitstream/1950/12931/3/2022A000771.pdf>
- Viña Miranda, C. E. (2019). *Aplicación de Jack Knife y Análisis de causa raíz de una flota de palas electromecánicas modelo Caterpillar 7495HR de Capacidad 120 Ton*. Universidad Católica de Santa María. Recuperado de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8897>

ANEXOS

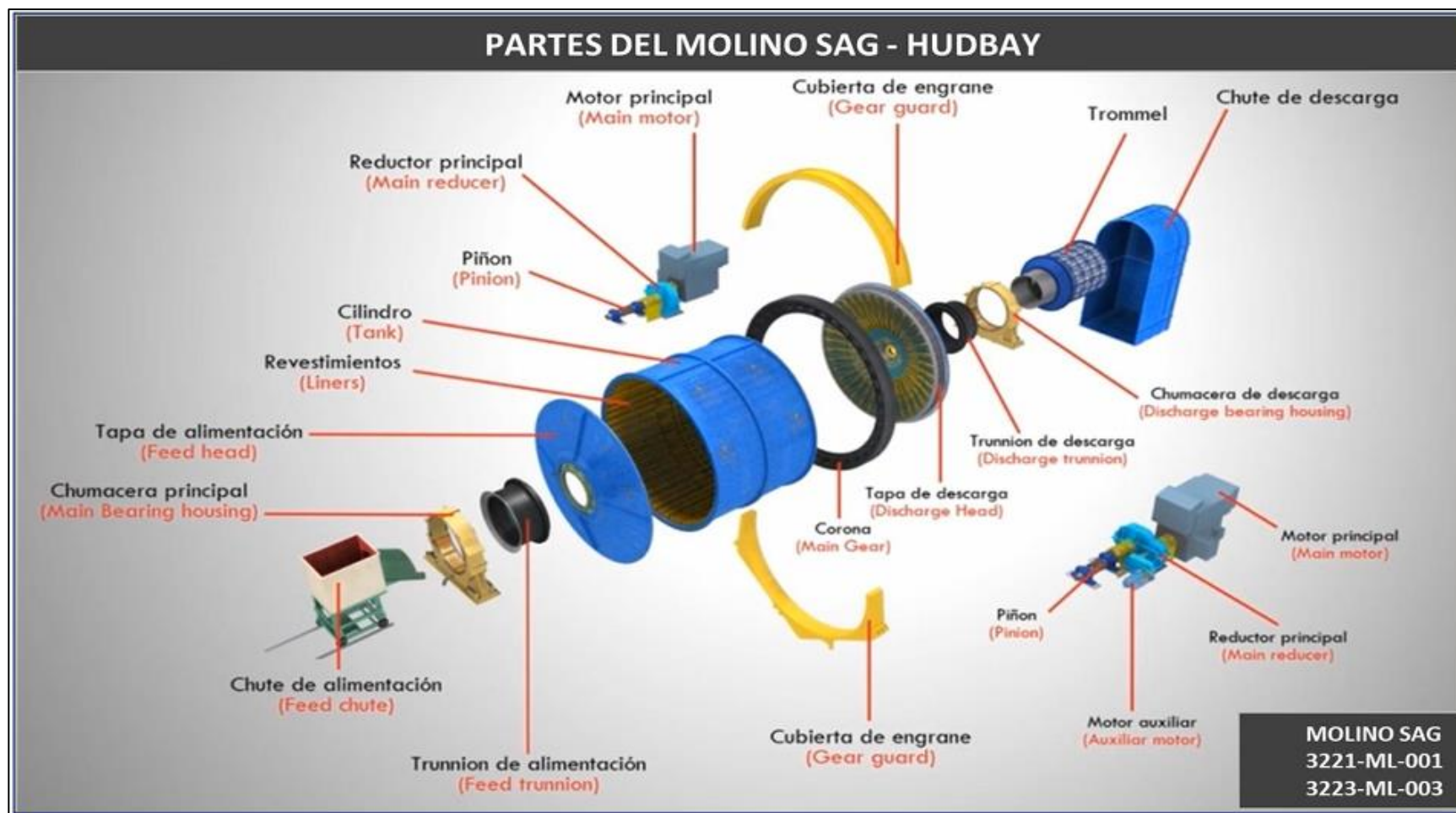
Anexo 1:	Sistemas principales del molino SAG	1
Anexo 2:	Partes principales del Molino SAG	2
Anexo 3:	Disposición del sistema de accionamiento en el molino SAG	3
Anexo 4:	Partes principales del Molino SAG – Vista inferior	4
Anexo 5:	Partes principales del descanso fijo del Molino SAG	5
Anexo 6:	Partes principales del descanso móvil del Molino SAG	6
Anexo 7:	Zapata hidrostática	7
Anexo 8:	Matriz de criterios de evaluación de la criticidad	8
Anexo 9:	Rangos para los niveles de criticidad.....	9
Anexo 10:	Línea de tiempos y fórmulas para el cálculo de los indicadores.....	10
Anexo 11:	Distribución de montaje y pesos de las nuevas mallas de trommel – molino SAG	11
Anexo 12:	Evidencia de los planes de acción implementados – caída de mallas	12
Anexo 13:	Ensamble de compontes de sujeciones de las mallas	13
Anexo 14:	Plano dimensional de las abrazaderas	14
Anexo 15:	Plano dimensional del trommel.....	15

Anexo 1: Sistemas principales del molino SAG



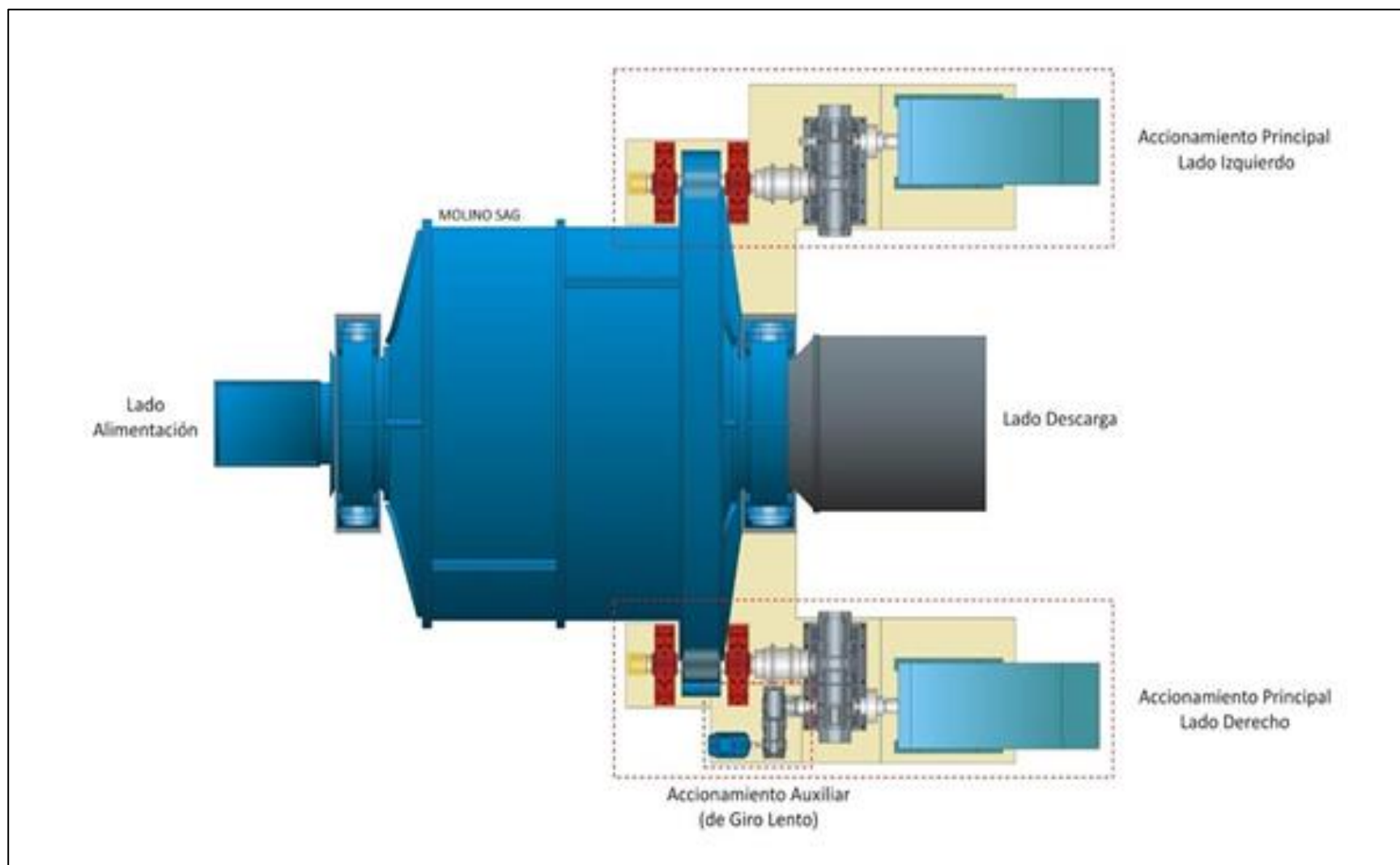
Nota. Manual HUBBAY. (2021).

Anexo 2: Partes principales del Molino SAG



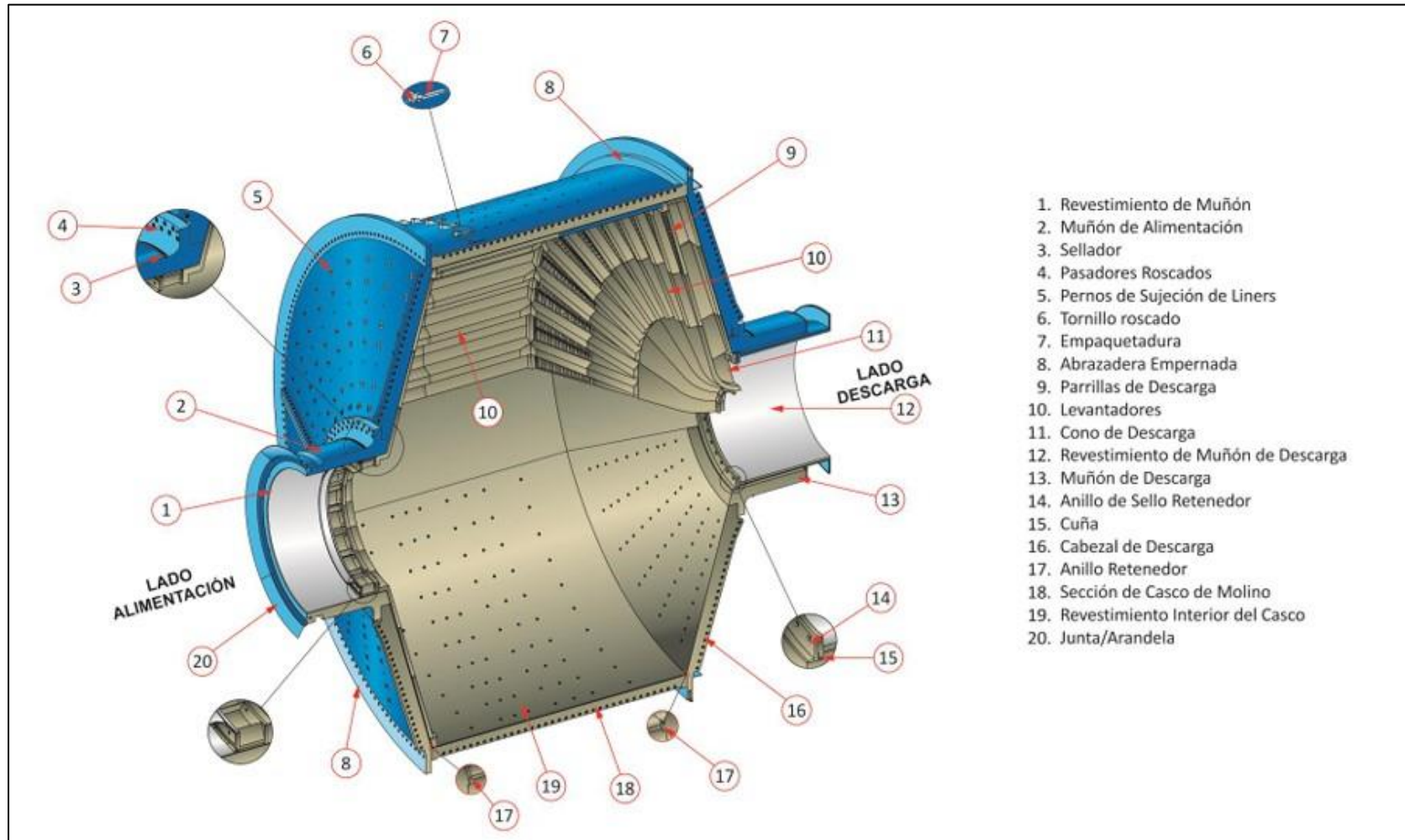
Nota. Manual HUBBAY. (2021).

Anexo 3: Disposición del sistema de accionamiento en el molino SAG



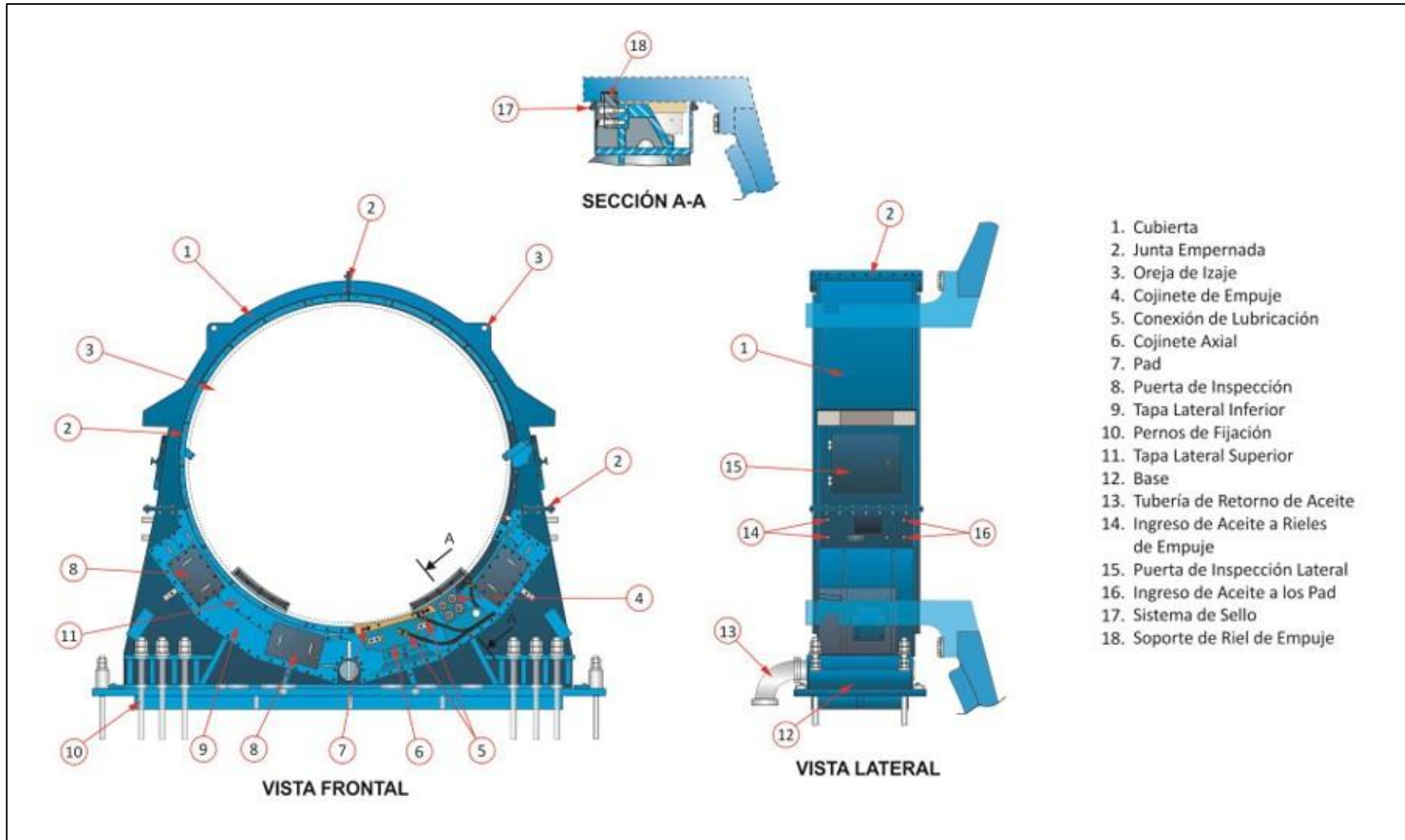
Nota. Manual HUBBAY. (2021).

Anexo 4: Partes principales del Molino SAG – Vista inferior



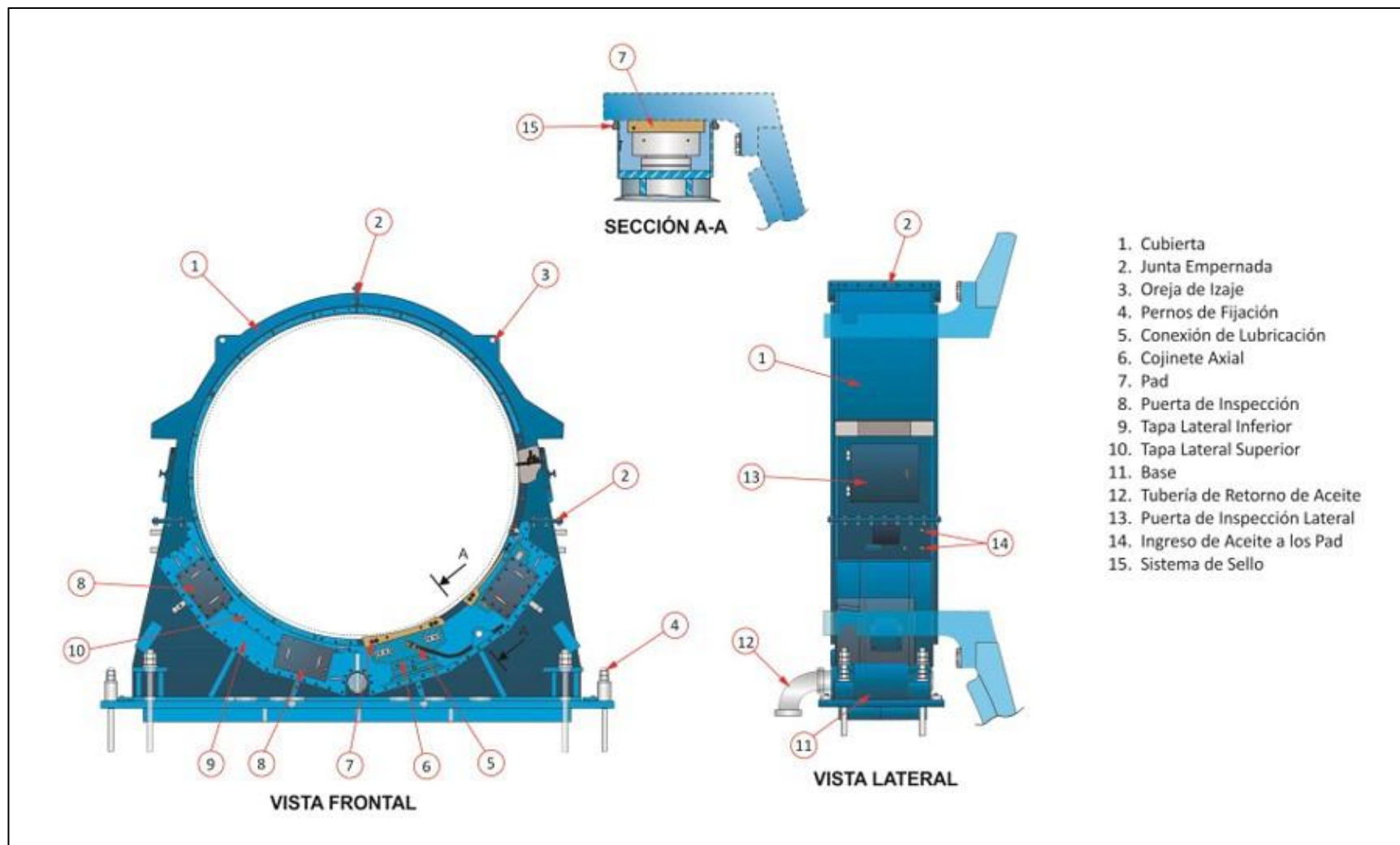
Nota. Manual HUBBAY. (2021).

Anexo 5: Partes principales del descanso fijo del Molino SAG



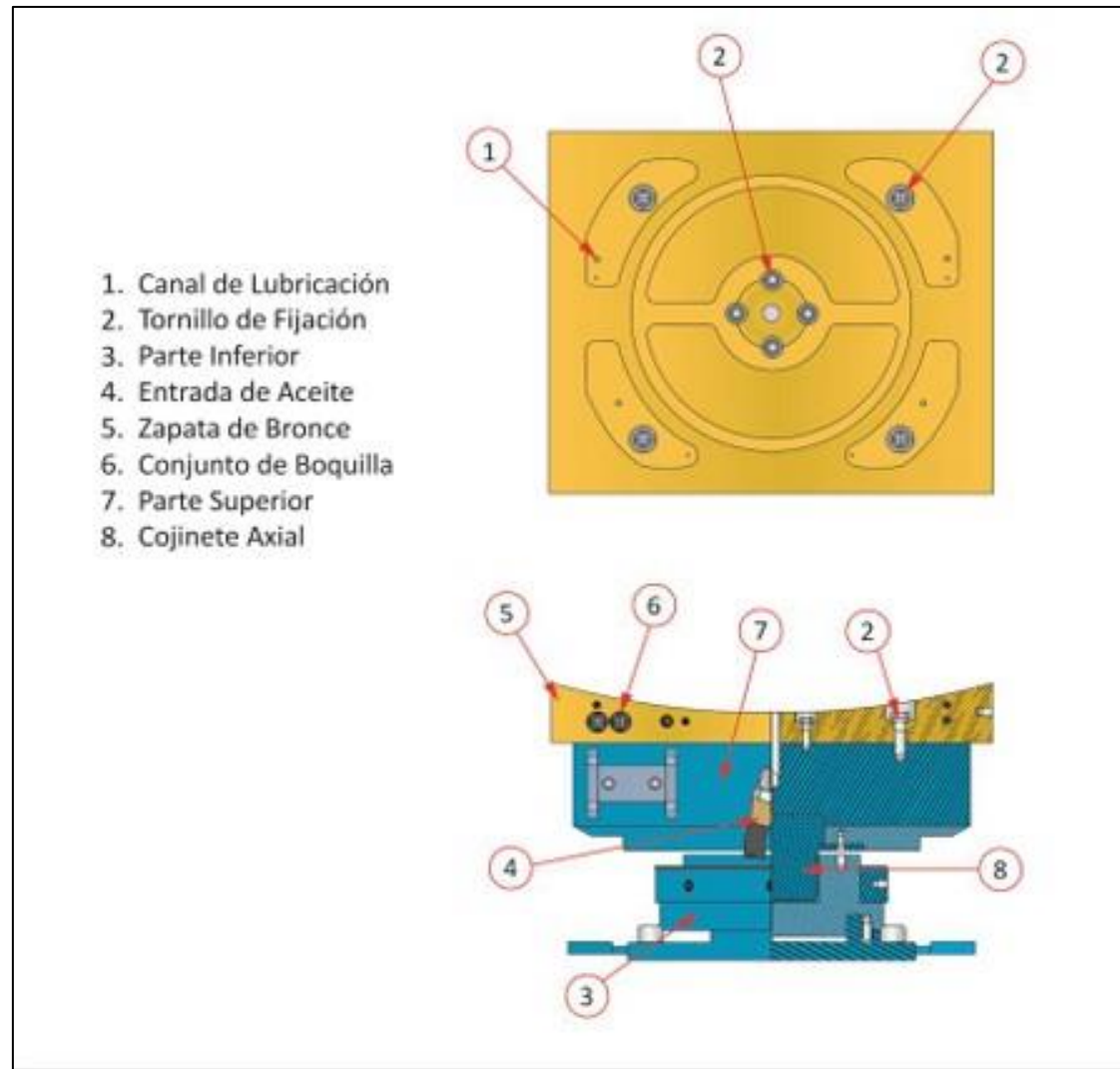
Nota. Manual HUBBAY. (2021).

Anexo 6: Partes principales del descanso móvil del Molino SAG



Nota. Manual HUBBAY. (2021).

Anexo 7: Zapata hidrostática



Nota. Manual HUDBAY. (2021).

Anexo 8: Matriz de criterios de evaluación de la criticidad

NIVEL DE IMPACTO	PUNTAJE	IMPACTO A LA PRODUCCIÓN (IP)	OCURRENCIA FALLA (OF)	COSTOS DE MANTENIMIENTO O (CM)	IMPACTO EN LA SEGURIDAD Y SALUD (ISS)	IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE (IMA)	IMPACTO EN LA MANTENIBILIDAD (IM)
MUY ALTA	4	Se reduce hasta el 100% de producción en la planta (90M Ton/día) Molibdeno: Se reduce hasta el 100% de producción en la planta (100 Ton/día)	Se han presentado o más de 10 eventos de falla por año	Los costos de mantenimiento o anual supero los \$ 500 000	Enfermedades o incidente que causan la muerte de varias personas (pandemia, intoxicación masiva, contacto con sustancias altamente toxicas, etc.)	Emergencia ambiental (Muy probable cierre de mina)	El equipo es reparado fuera de las instalaciones de la planta (3 días a más)
ALTA	3	Se reduce el 50% de producción en la planta (45M Ton/día) Molibdeno: Se reduce hasta el 50% de producción en la planta (50 Ton/día)	Se han presentado o de 8 a 10 eventos de falla por año	Los costos de mantenimiento o anual son mayores a \$ 250 000 hasta \$ 500 000	Una fatalidad, estado vegetal. Invalidez total del cuerpo	Cualquier tipo de derrame con daño al medio receptor y su remediación y/o limpieza requiere de apoyo especializado externo a HBP	El tiempo medio para reparar es más de 12 horas a 3 días
MEDIO	2	Se reduce desde el 30% hasta el 49% de producción en la planta (27M Ton/día – 44 M Ton/día) Molibdeno: Se reduce hasta el 30% hasta 49% de producción en la planta (30 Ton/día - 49 Ton/día)	Se han presentado o de 5 a 7 eventos de falla por año	Los costos de mantenimiento o anual son mayores a \$ 100 000 hasta \$ 250 000	Lesiones que incapacitan a la persona para su actividad normal de por vida. Enfermedades ocupacionales irreversibles o masivas (intoxicación, hipoacusia, neumoconiosis, cáncer asociado a carcinógenas, etc.) Monitoreos de Higiene sobrepasan estándares establecidos en la legislación	Cualquier tipo de derrame con daño al medio receptor fuera de la zona de trabajo y su remediación y/o limpieza se extiende a más de 1 día con el Equipo de Respuesta a Emergencia HBP	El tiempo medio para reparar es desde 6 a 12 horas
BAJA	1	Se reduce desde el 10% hasta el 29% de producción en la planta (9M Ton/día – 26M Ton/día) Molibdeno: Se reduce desde el 10% hasta el 29% de producción en la planta (10 Ton/día - 29 Ton/día)	Se han presentado o de 1 a 4 eventos de falla por año	Los costos de mantenimiento o anual son mayores a \$ 50 000 hasta \$ 100 000	Lesiones/enfermedades que incapacitan a la persona temporalmente y/o requieren tratamiento médico (lesiones ergonómicas, deshidratación con descanso médico, etc.)	Cualquier tipo de derrame con daño al medio receptor fuera de la zona de trabajo y su remediación y/o limpieza se extiende a 1 o 2 días con brigadistas la respuesta	El tiempo medio para reparar es desde 2 a 6 horas
MUY BAJO	0	Se reduce menos del 10% de producción en la planta (< 9M Ton/día) Molibdeno: Se reduce menos del 10% de producción en la planta (< 10 Ton/día)	No se han presentado o eventos de falla	Los costos de mantenimiento o anual son inferiores a \$ 50 000	Lesiones/enfermedades que luego de una evaluación médica (primero auxilios y/o tratamiento médico) genera o pueda generar un descanso breve con retorno máximo al día siguiente a sus labores habituales.	Cualquier tipo de derrame con impacto al medio receptor dentro de la zona de trabajo y es limpiado/remediado de manera inmediata	El tiempo medio para reparar es menos de 2 horas

Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Anexo 9: Rangos para los niveles de criticidad

CRITICIDAD	Nivel	MÍNIMO	MÁXIMO
A	MUY ALTA	59	80
B	ALTA	39	58
C	MEDIO	19	38
D	BAJO	0	18

Nivel de criticidad	Acción	Criterios de confiabilidad
MUY ALTA	Equipo altamente crítico, capaz de causar daños graves en caso de falla, con una alta probabilidad de ocurrencia. Se deben tomar todas las precauciones para evitar que se produzcan daños en este activo y se debe considerar seriamente la posibilidad de tener piezas de repuesto (si es práctico) para este activo.	Aplicar técnicas reactivas - Análisis de causa Raíz - Herramientas de simulación
ALTA	Un componente crítico de equipo, capaz de causar un daño mayor en caso de falla. Se deben tomar todas las precauciones para evitar que se produzcan daños en este activo y se debe considerar seriamente la posibilidad de tener piezas de repuesto (si es práctico) para este activo.	Aplicar técnicas reactivas - Análisis de causa Raíz - Herramientas de simulación
MEDIO	Una pieza importante del equipo, con el potencial de causar daños en caso de falla. El activo se debe mantener regularmente para tratar de evitar fallas; se debe considerar la posibilidad de tener piezas de repuesto para este activo.	Aplicar Técnica proactivas - Mantenimiento centrado en la Confiabilidad (RCM) - Inspección basada en Riesgo (IBR) - Confiabilidad Basada en repuestos (RCS)
BAJO	Es poco probable que cause un daño duradero en caso de falla, los activos deben mantenerse según sea necesario. Solo se deben considerar los repuestos dependiendo del número de activos similares en el sitio.	- Uso de planes genéricos - Revisión de frecuencias

Nota. Unidad minera Constanica. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Anexo 10: Línea de tiempos y fórmulas para el cálculo de los indicadores

TIEMPO CALENDARIO (TCAL)					
TIEMPO BASE (TB)					Tiempo de Razón Externa (TRE)
TIEMPO DISPONIBLE (TD)			TIEMPO DE MANTENIMIENTO (TM)		
UTILIZACIÓN	TIEMPO DE PARADA OPERACIONAL (TO)		DETENCIONES POR MANTENIMIENTO		
TIEMPO NETO DE UTILIZACIÓN (TNU)	Tiempo de Parada Operacional Planeado (TOP)	Tiempo de Parada Operacional No Planeado (TONP)	Tiempo de Mantenimiento Planeado (TMP)	Tiempo de Mantenimiento No Planeado (TMNP)	

DISPONIBILIDAD = $\left(\frac{\text{TIEMPO CALENDARIO (TCAL)} - \text{TIEMPO DE MANTENIMIENTO (TM)} - \text{TIEMPO DE RAZÓN EXTERNA (TRE)}}{\text{TIEMPO CALENDARIO (TCAL)} - \text{TIEMPO DE RAZÓN EXTERNA (TRE)}} \right) \times 100\%$

DISPONIBILIDAD = $\left(\frac{\text{TCAL} - (\text{TMP} + \text{TMNP}) - \text{TRE}}{\text{TCAL} - \text{TRE}} \right) \times 100$... Formula 1

Donde:

- TCAL: Tiempo Calendario... (h)
- TMP : Tiempo de mantenimiento planeado ... (h)
- TMNP: Tiempo de mantenimiento No planeado ... (h)
- TRE : Tiempo de razón externa... (h)
- TOP : Tiempo de parada operacional planeado ... (h)
- TONP: Tiempo de parada operacional No planeado... (h)

Tiempo de mantenimiento (TM)=Tiempo Mantenimiento Planeado (TMP) + Tiempo Mantenimiento No Planeado (TMNP)

Tiempo de parada Operacional (TO)=Tiempo Parada Operacional Planeado(TOP) + Tiempo Parada Operacional No Planeado (TONP)

Donde:

- TEF: Tiempo de evento de fallas.
- NMNP: Numero de mantenimiento No Planeado
- NEF: Tiempo de eventos de falla

Tiempo de Eventos de Falla (TEF): Es la sumatoria de tiempo de Paradas No programadas= (TMNP)

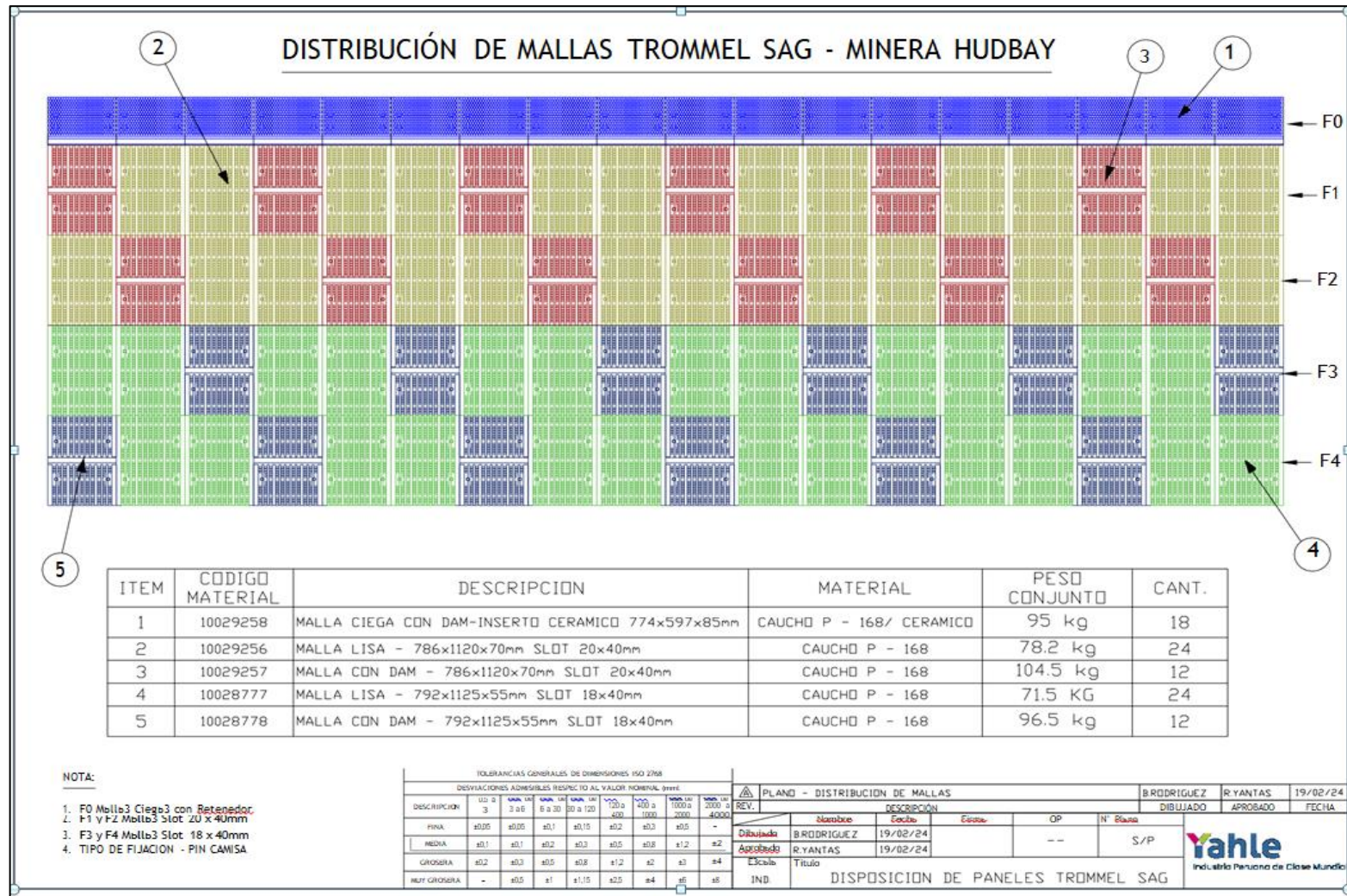
Numero de Eventos de Falla (NEF): Es la cantidad total de eventos de falla que ocurren en tiempo establecido

MTBF = $\frac{\text{TIEMPO CALENDARIO (TCAL)} - \text{TIEMPO DE EVENTOS DE FALLA (TEF)}}{\text{NUMERO DE EVENTOS DE FALLA (NEF)}} = \frac{\text{TCAL} - (\text{TMNP})}{\text{NMNP}}$... Formula 2

MTTR = $\frac{\text{TIEMPO DE EVENTOS DE FALLA (TEF)}}{\text{NUMERO DE EVENTOS DE FALLA (NEF)}} = \frac{\text{TMNP}}{\text{NMNP}}$... Formula 3

Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Anexo 11: Distribución de montaje y pesos de las nuevas mallas de trommel – molino SAG



Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Anexo 12: Evidencia de los planes de acción implementados – caída de mallas

Con las abrazaderas revestidas se evidencio menor desgaste en el agujero. 23.5 mm (Nominal 23 mm)



Se realizo el cambio completo en ambos molinos
ML001: el 19 de septiembre 2024
ML003: el 20 de septiembre 2024

En los nuevos pines se registra menor desgaste y mayor sujeción; así también menor soltura entre asientos de las mallas y las abrazaderas



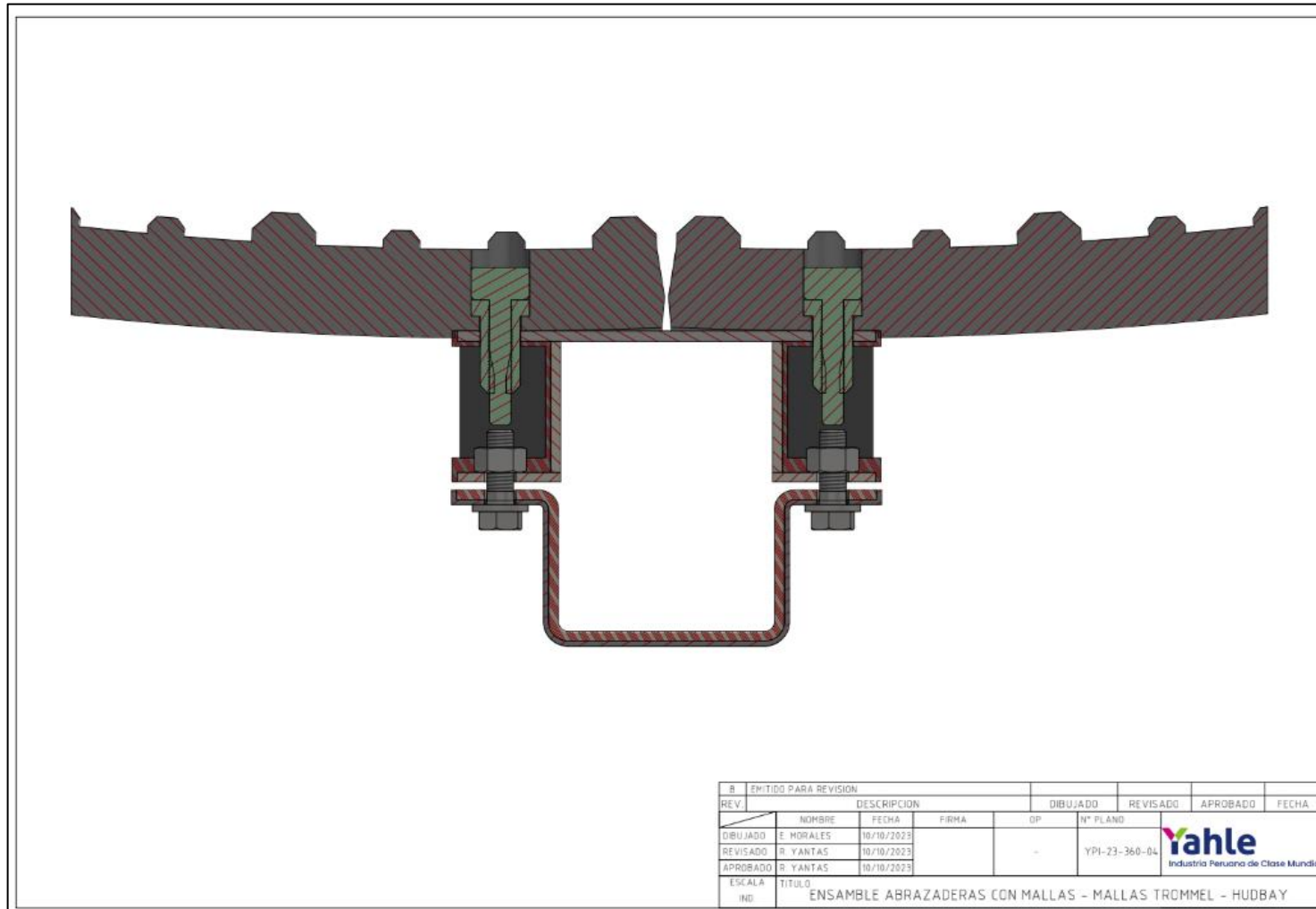
Los espacios entre mallas se esta corrigiendo con soguillas



PENDIENTE: El fabricante debe enviar el análisis del trommel frame y las correcciones en el diseño de mallas)

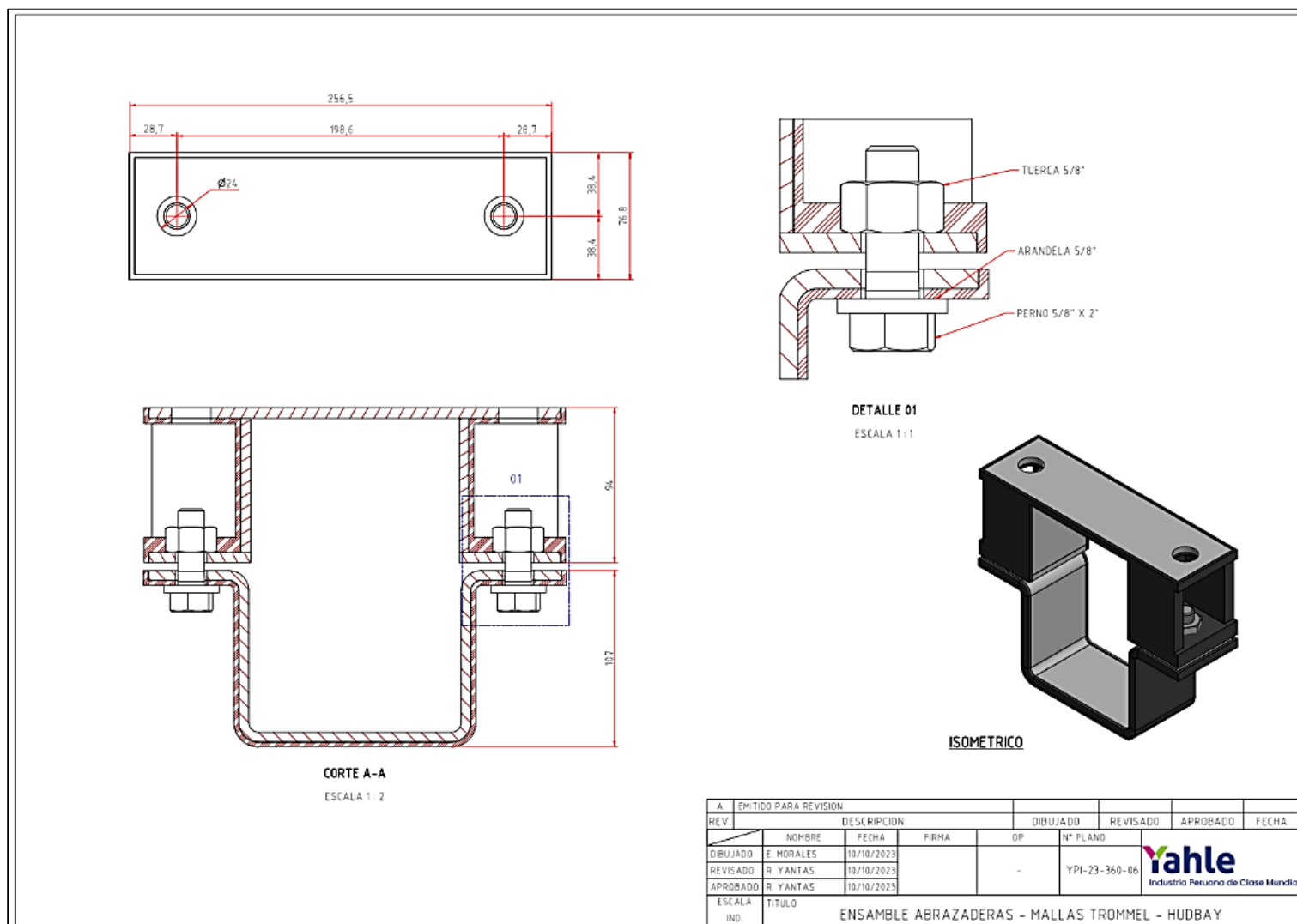
Nota. Unidad minera Constanica. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Anexo 13: Ensamble de compontes de sujeciones de las mallas



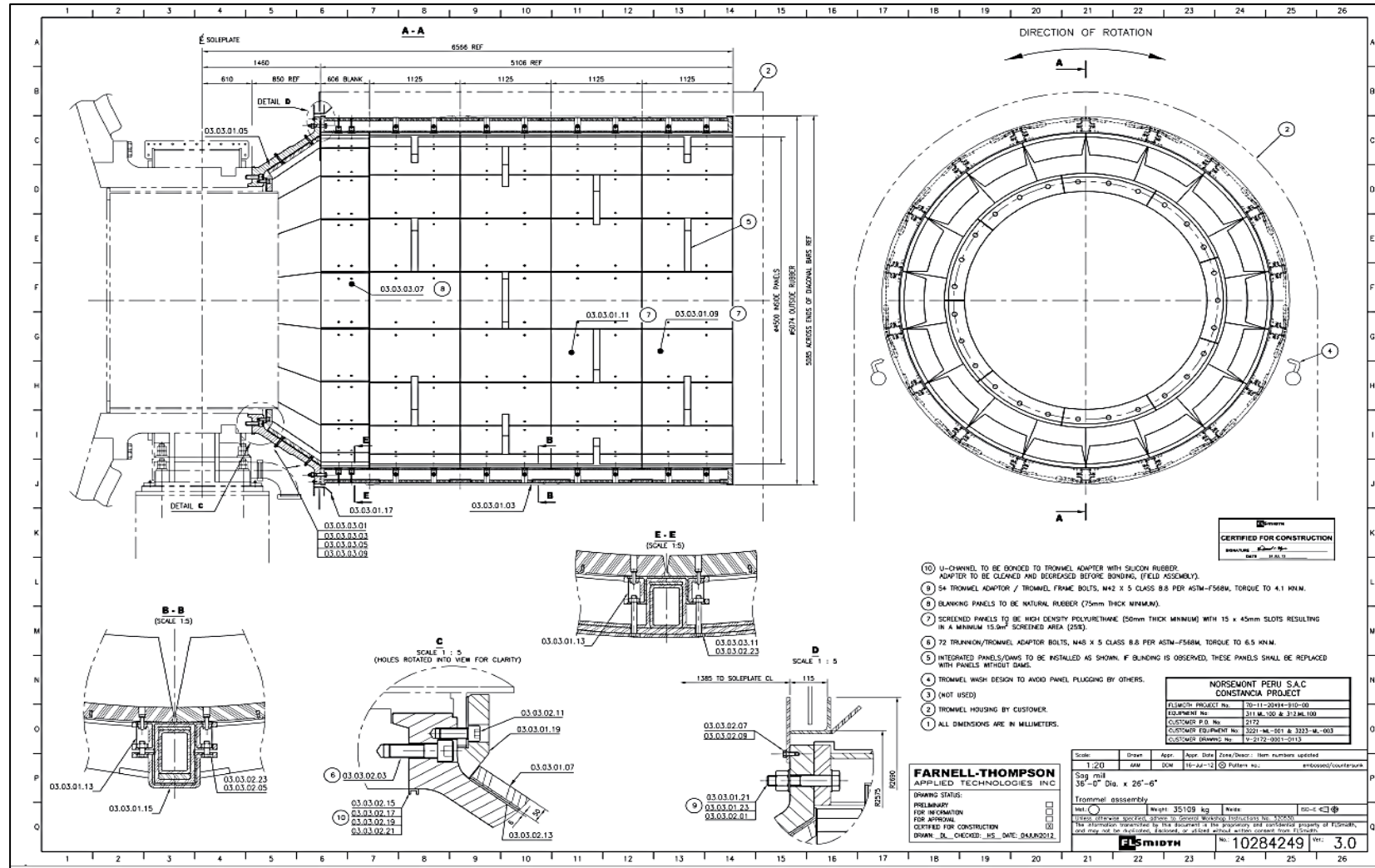
Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Anexo 14: Plano dimensional de las abrazaderas



Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.

Anexo 15: Plano dimensional del trommel



Nota. Unidad minera Constancia. (2024). Datos del área de mantenimiento y confiabilidad.