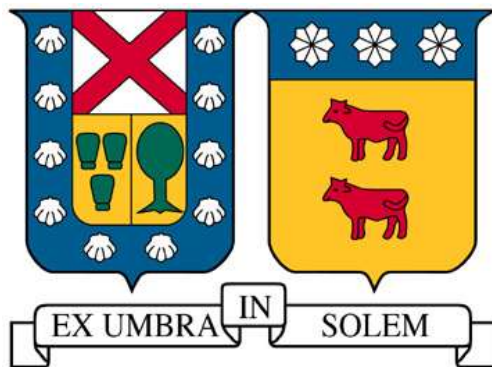


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO – CHILE



EVALUACION DEL IMPACTO DE LA MODERNIZACION DE
CHANCADORES TERCIARIOS SOBRE LA GESTION DE
ACTIVOS EN PLANTA CONCENTRADORA

FRANCISCO ANTONIO SOTO SANTANDER

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO

PROFESOR GUÍA: SR. CRISTIAN CARVALLO GONZALEZ



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título; ☒ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación del impacto de la modernización de chancadores terciarios sobre la gestión de activos en planta concentradora

Nombre del candidato(a): Francisco Soto Santander

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Santiago Vitacura ; Departamento: Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Cristian Carvallo González, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 12/09/25 ; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03/09/25

; Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen Ejecutivo

La Planta Concentradora de División Norte (DN) enfrentaba desafíos críticos en su etapa de chancado terciario: 10 chancadores Symons (operando +40 años sin mejoras estructurales) presentaban baja confiabilidad, disponibilidad (89% vs. meta 95%) y altos costos por fallas (USD 1.740.700/año en CHT5). Esto generaba pérdidas de producción valuadas en USD 29,000 por hora de detención.

Se aplicó el ciclo **PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar)** para modernizar los equipos:

- **Planificar:** Diagnóstico con análisis de criticidad (método Jack-Knife) identificó al CHT5 como prioritario por riesgo de falla catastrófica en bastidor.
- **Hacer:** Modernización "Semi-Full" (octubre 2023) con reparación estructural e integración de componentes de alto desempeño (USD 1,540,000 de inversión).
- **Verificar:** Monitoreo de indicadores post-intervención.
- **Actuar:** Réplica del modelo en 4 chancadores adicionales (2023-2024).

Resultados Clave (CHT5, 2024 vs. 2023)

Indicador	2023	2024	Mejora
Disponibilidad	89.5%	96.8%	+7.3 pts
MTTR	3.38 h	1.92 h	-43%
Costos por fallas	USD 1.7M	USD 0.6M	-64.6%

Beneficio económico: USD 7.528.280/año por equipo (por reducción de detenciones y aumento de productividad), con ROI de 3 meses.

El impacto estratégico es el siguiente:

- **Escalabilidad:** Extendido a 4 chancadores adicionales con resultados homogéneos.

- **Gestión de activos:** Alineación con **ISO 55001:2024** mediante integración de datos (SAP), evaluación de riesgos y mejora continua.
- **Seguridad operativa:** Reducción de 35% en tiempo de intervenciones y eliminación de riesgos en "línea de fuego".

Las conclusiones obtenidas son:

1. La modernización incrementó la **confiabilidad operativa** y superó metas corporativas, validando el enfoque PHVA como herramienta eficaz para gestión de activos en minería.
2. El análisis de **críticidad** (no solo frecuencia de fallas) fue clave para priorizar inversiones y evitar pérdidas potenciales por fallas catastróficas.
3. El modelo es **escalable al resto de los chancadores** y replicable en otras etapas (ej: chancado primario), con proyecciones de ahorro acumulado superior a USD 30 millones anuales.

Se tienen las siguientes recomendaciones:

- Escalar el PHVA a toda la cadena de valor (chancado primario, correas transportadoras) para reducir el MTTR en 30%.
- Implementar tecnología 4.0 (sensores IoT en cojinetes, gemelos digitales) para monitoreo en tiempo real y mantenimiento predictivo.
- Desarrollar programas de capacitación en realidad virtual que reduzcan en 25% el tiempo de reparaciones complejas.

Palabras clave: Gestión de activos; Chancadores terciarios Tipo SYMONS; Ciclo PHVA (PDCA); Confiabilidad operacional; Disponibilidad; Modernización tecnológica; Industria 4.0.

Abstract

The Concentrator Plant of División Norte (DN) was facing critical challenges in its tertiary crushing stage: ten SYMONS-type crushers (operating for over 40 years without structural upgrades) showed low reliability, availability (89% vs. 95% target), and high failure-related costs (USD 1,740,700/year in CHT5). This caused production losses valued at USD 29,000 per hour of tertiary line downtime.

The PDCA cycle (Plan-Do-Check-Act) was applied to modernize the equipment:

- **Plan:** Criticality diagnosis using the Jack-Knife method identified CHT5 as a priority due to the risk of catastrophic frame failure.
- **Do:** "Semi-Full" modernization (October 2023) with structural repair and integration of high-performance components (USD 1,540,000 investment).
- **Check:** Post-intervention monitoring of performance indicators.
- **Act:** Replication of the model in 4 additional crushers (2023–2024).

Key Results (CHT5, 2024 vs. 2023)

Indicador	2023	2024	Improve
Avalilability	89.5%	96.8%	+7.3 pts
MTTR	3.38 h	1.92 h	-43%
Fail Costs	USD 1.7M	USD 0.6M	-64.6%

Economic Benefit: USD 7,528,280 per year per unit (due to reduced downtime and increased productivity), with an ROI of 3 months.

Strategic Impact of the Implemented Solution

- **Scalability:** Extended to 4 additional crushers with consistent results.

- Asset Management: Alignment with ISO 55001:2024 through data integration (SAP), risk evaluation, and continuous improvement.
- Operational Safety: 35% reduction in intervention time and elimination of “line-of-fire” risks.

The principal conclusions of the study, are:

Modernization increased operational reliability and exceeded corporate targets, validating the PDCA cycle as an effective asset management tool in mining.

Criticality analysis (not just failure frequency) was key to prioritizing investments and preventing potential catastrophic losses.

The model is scalable to other crushers and replicable in different stages (e.g., primary crushing), with projected cumulative savings exceeding USD 30 million annually.

The recommendations of this study are:

Scale the PDCA cycle to the entire value chain (primary crushing, conveyor belts) to reduce MTTR by 30%.

Implement Industry 4.0 technologies (IoT sensors in bushings, digital twins) for real-time monitoring and predictive maintenance.

Develop virtual reality training programs to reduce the duration of complex repairs by 25%.

Keywords: Asset Management; Tertiary Crushers; PDCA Cycle; Operational Reliability; Availability; Technological Modernization; Industry 4.0.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES DEL TEMA	10
1.1. JUSTIFICACIÓN	11
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1. <i>Objetivo General</i>	14
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	14
1.3. ALCANCE	15
1.4. METODOLOGÍA	17
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	19
2.1. ANTECEDENTES	20
2.1.1. <i>Relevancia del sector minero en la economía nacional e internacional.</i>	20
2.1.2. <i>Principales procesos unitarios en minería (concentración, chancado, molienda).</i> ..	24
2.1.3. <i>Caracterización de la Empresa / División</i>	27
2.1.3.1. Capacidad instalada y estructura del área de chancado.	27
2.1.3.2. Objetivos estratégicos en cuanto a productividad y eficiencia operativa.	28
2.1.4. <i>Importancia estratégica del proceso de chancado en la cadena de valor.</i>	29
2.1.5. <i>Antecedentes sobre Gestión de Activos en la Industria Minera</i>	30
2.1.5.1. Desafíos en la operación y mantenimiento de chancadores.	31
2.1.6. <i>Uso del Ciclo PHVA en la Mejora Continua de Activos</i>	33
2.1.6.1. Aplicaciones del ciclo Deming en entornos industriales.	33
2.1.6.2. Implementación práctica en proyectos de mejora en minería.....	34
2.1.6.3. Casos documentados y buenas prácticas.	35
2.1.7. <i>Resumen de antecedentes y su articulación con los objetivos del estudio</i>	37
2.2. MARCO TEÓRICO	39
2.2.1. <i>Indicadores Clave en la Gestión de Activos</i>	40
2.2.2. <i>Reemplazo de equipos</i>	41
2.2.3. <i>Evaluación de Criticidad</i>	42
2.2.4. <i>Ciclo PHVA Aplicado a la Gestión de Activos</i>	45
2.2.5. <i>Evaluación Económica de Mejoras Operacionales</i>	48
2.3. NORMA ISO 55001 (VERSIÓN 2024) Y SU ENFOQUE EN LA MEJORA CONTINUA	50

2.4.	PROPUESTA METODOLÓGICA	52
CAPÍTULO 3 DESARROLLO		58
3.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
3.1.1.	<i>Fase de Planificación: diagnóstico y comparación de desempeño</i>	59
3.1.2.	<i>Fase de Planificación: Análisis de criticidad.</i>	61
3.1.3.	<i>Fase de Hacer: Aplicación de modernización</i>	63
3.1.4.	<i>Fase de Verificación: Comparación de desempeño</i>	65
3.1.5.	<i>Resultados del análisis económico</i>	65
3.1.6.	<i>Visualización gráfica de resultados</i>	70
3.2.	DISCUSIÓN	73
3.2.1.	<i>Interpretación de los hallazgos.</i>	73
3.2.2.	<i>Validación del enfoque PHVA en la gestión de activos</i>	75
4.	CONCLUSIONES	78
5.	BIBLIOGRAFÍA	80

1. Introducción

Según lo expuesto por Nilo (2006), la búsqueda constante de efectividad y la mejora continua en los procesos industriales es un rasgo definitorio de las organizaciones en el contexto de la competencia global. Desde sus inicios, el área de mantención se consideró primordialmente como un medio para asegurar un mantenimiento planificado a bajo costo; sin embargo, con el paso del tiempo, el enfoque evolucionó hacia la optimización de la disponibilidad de la planta, priorizando el logro de una mayor eficiencia operativa.

En este ambiente, las plantas con una vida o trayectoria de mas de 5 décadas, han tenido la obligación de mejorar sus procesos internos de gestión, y también han tenido que invertir en tecnología, para poder alcanzar las metas productivas, que año a año son más desafiantes. Para asegurar la competitividad del negocio, es indispensable proponer nuevas estrategias que aborden la problemática anterior. El caso de análisis que se presenta a continuación es el de una planta concentradora que opera desde los años 70, y cuenta con equipos de procesamiento que no han variado mayormente su configuración base. La creciente demanda de metas productivas, más la baja de las leyes del mineral y los altos costos de operación, están poniendo en jaque la operación y continuidad de la compañía.

Sumado a lo anterior, se agrega la variable fallas “aleatorias” que han afectado en cumplimiento las metas de producción, y han deteriorado de manera dramática la condición física de los activos. Los indicadores claves de gestión, los últimos años han venido a la baja, y la gerencia ha declarado en forma enérgica, la necesidad de un cambio, al ver como los esfuerzos por mejorar la condición de los activos han sido infructuosos, y como los resultados no han sido los esperados.

Por lo anterior, para abordar el caso de análisis, se ha elegido el enfoque de mejora continua para establecer una estrategia de mejora en la gestión de activos

físicos de los chancadores de cono; como equipos principales de la planta de chancado; porque se centra en la eliminación de pérdidas, en la optimización de procesos y el fomento de la creación de valor continuo-

En consecuencia, este trabajo adopta el Ciclo Deming (PHVA) como metodología central. Dicho enfoque estructurado y adaptativo permite implementar, evaluar y ajustar cambios de manera iterativa, sin requerir análisis estadísticos avanzados. Además, favorece la participación activa del equipo operativo y fomenta el trabajo colaborativo, elementos esenciales para revertir las tendencias a la baja en los indicadores de gestión de los chancadores de cono terciarios. Con ello, se busca no solo mejorar la eficiencia y efectividad en la administración de activos físicos, sino también garantizar la sostenibilidad y competitividad de la planta concentradora en el largo plazo.

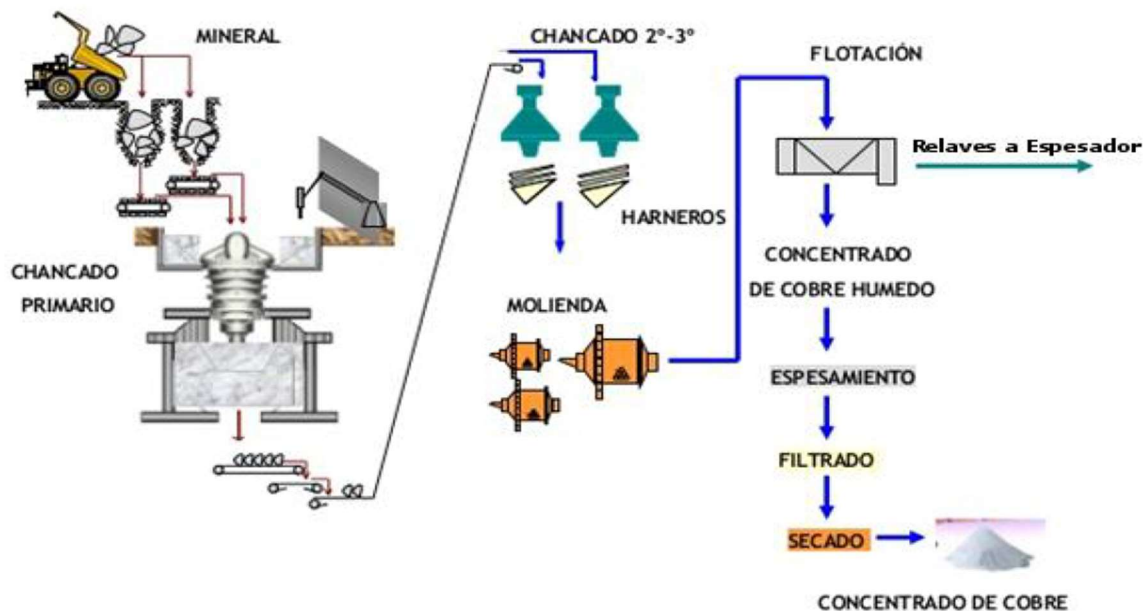
CAPÍTULO 1. Antecedentes del Tema

1.1. Justificación

El caso de análisis a presentar se centrará en la operación y desempeño de la Planta Concentradora de la Corporación Minera **DIVISION NORTE** (En adelante DN), ubicada en el norte grande de Chile, cercano a la ciudad de Calama.

Esta planta de procesamiento está conformada por todas las etapas propias del proceso de obtención de concentrados de cobre (Figura 1).

Figura 1. Esquema típico de proceso de concentrado de cobre Corporacion DivisionNorte.



Fuente: Fuenzalida Hidalgo, Nicolas. Memoria Ingeniería Civil Química. U. de Chile. 2017.

El proceso comienza en la mina (yacimiento a cielo abierto), posteriormente el mineral ROM (Run OFF Mine) se transporta hacia los chancadores primarios donde se reduce su tamaño. Luego el mineral pasa a la etapa de chancado secundario y terciario para reducir aún más el tamaño del mineral mediante chancadores tipo cono. La etapa siguiente es la molienda donde el tamaño del

mineral es reducido al tamaño final de partícula. Las siguientes etapas son flotación, espesamiento y filtrado.

La planta de chancado tiene una capacidad instalada de procesamiento de 3.4 millones de toneladas secas de mineral, por mes. Está conformada por 5 líneas de chancado secundario, que a su vez alimentan a 10 líneas de chancadores terciarios. (cada línea consta de 1 chancador secundario y 2 chancadores terciarios). La detención de 1 hora de una sección afecta en 55 KUSD\$ aproximadamente.¹

La compañía a través de su gerencia de operaciones ha detectado que el “cuello de botella” del proceso anterior, hoy en día, lo constituye la etapa de chancado secundario y terciario, y en particular esta última, básicamente por la disminución de las horas efectivas de operación, de los chancadores de cono terciarios.

Se han definido los siguientes indicadores de gestión, y sus valores óptimos globales del área²:

Tabla 1. *Indicadores de Gestión de activos planta chancado DN.*

NEGOCIO	UNIDAD	META (Hrs.)
Confiabilidad de sistemas críticos (harneros, chancadores, correas)	TMEF	36
Tiempo medio para reparar	MTTR	2
Utilización	%	85
Disponibilidad	%	92

Fuente: S.I. chancado DN.

¹ Precio del cobre de 4,3 USD\$/lb. Año 2024.

² Comprende todos los equipos de las instalaciones.

Actualmente, los indicadores de gestión de la planta se encuentran por debajo de los objetivos establecidos (73% de utilización y 81% de disponibilidad).

Las fallas significativas en los chancadores terciarios han impactado negativamente el rendimiento, poniendo en riesgo el cumplimiento de metas. Aunque se ha implementado una estrategia de mantenimiento planificado basada en un plan matriz y pautas frecuentes, los métodos actuales han resultado insuficientes para medir y gestionar eficazmente el desempeño de los activos, lo que conduce a decisiones inadecuadas y pérdidas económicas.

Los equipos, modernizados según avances tecnológicos de décadas pasadas, han permanecido sin cambios en su configuración base por más de 40 años. Actualmente, sus componentes críticos presentan fatiga, provocando detenciones no programadas pese al continuo plan de reparaciones integrales. Esta situación demanda soluciones urgentes y efectivas.

Ante este panorama, se requiere adoptar una metodología de trabajo, y perdurable, que resuelva estos problemas. Se propone la aplicación de la mejora continua mediante el Ciclo Deming (PHVA), enfoque estructurado y adaptativo que simplifica la implementación de ajustes sin necesidad de análisis estadísticos complejos. Este método, al involucrar al equipo operativo, facilita la generación de mejoras iterativas en el desempeño de los chancadores terciarios, promoviendo mayor eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad operativa.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar el impacto de la modernización de los chancadores terciarios sobre los indicadores clave de gestión de activos en la Corporación Minera División Norte (DN) para optimizar la confiabilidad operacional, reducir costos de mantenimiento y sustentar decisiones de inversión basadas en evidencia técnica-económica.

1.2.2. Objetivos Específicos

En base a lo anterior, se proponen como objetivos específicos:

- Realizar un diagnóstico de la situación actual de los chancadores de cono terciarios, incluyendo la recopilación y análisis de datos históricos de desempeño de los equipos, para identificar las causas principales de la variabilidad operativa en un plazo de 12 meses (año 2023).
- Identificar y cuantificar brechas de rendimiento o áreas con potencial de mejora en los chancadores, estableciendo métricas en un período de 2 meses.
- Proponer recomendaciones basadas en el diagnóstico realizado, priorizando aquellas con mayor impacto potencial en la eficiencia operativa y reducción de costos, y establecer un plan de implementación dentro de los próximos 4 meses.
- Evaluar el impacto operativo y económico de la estrategia propuesta, mediante un análisis comparativo pre y post implementación de al menos 6 meses, utilizando indicadores de rendimiento clave como reducción de tiempos de inactividad y mejoras en la productividad.

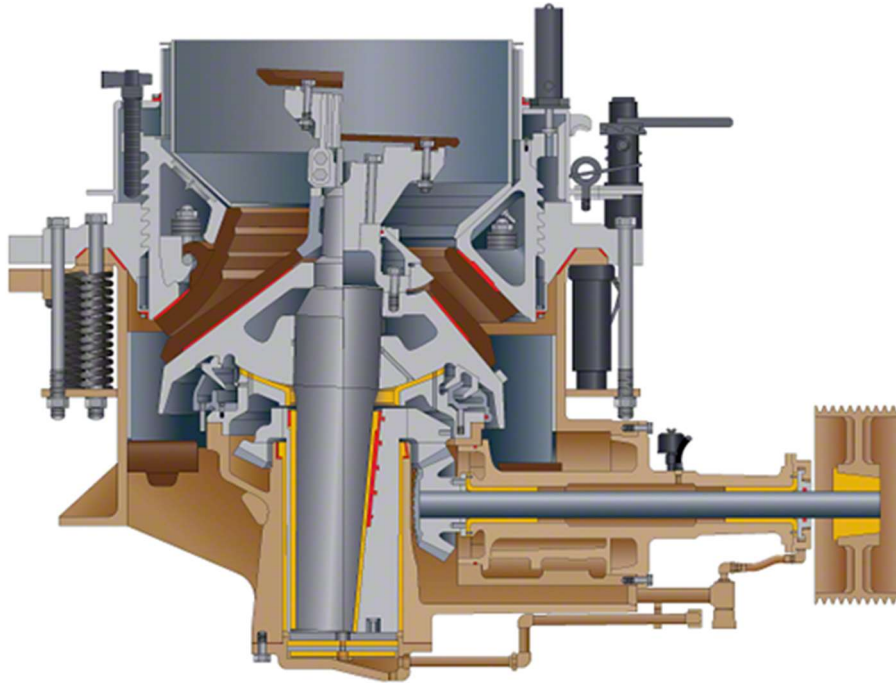
1.3. Alcance

El presente trabajo adopta un enfoque correlacional y descriptivo, y se centra en el análisis de datos operacionales históricos provenientes del área de chancado terciario de la Corporación Minera División Norte, esto permitirá el enfoque en identificar y describir las causas de las fallas en los equipos definidos como críticos del periodo 2023, y analizará las relaciones entre estas causas y los indicadores de gestión de activos para implementar mejoras efectivas.

Los datos utilizados comprenden registros operacionales del período 2023 – 2024, suministrados directamente por la organización. Estos datos permiten realizar una comparación entre el desempeño de los equipos antes y después del proceso de modernización que permite medir el efecto directo de las intervenciones implementadas.

Como ya se ha planteado, en el objetivo general, los activos físicos que serán considerados en el presente estudio son los chancadores de cono terciarios de la planta de chancado de la corporación Minera Division Norte, más sus sistemas auxiliares, los que en total suman 10 equipos (chancadores tipo SYMONS de cono, figura 2).

Figura 2. Chancador de Cono 7' TÍPICO.



Fuente: Nordberg Inc. SYMONS Crusher Manual.

La finalidad de enfocarse en esta etapa del proceso de chancado radica principalmente en que esta etapa es la última antes del proceso de molienda, por lo que es crucial la calidad del producto a entregar a la etapa de molienda y el volumen entregado para cumplir la producción.

Como antecedente relevante, estos equipos llevan operando más de 40 años en la planta de chancado, y han experimentado algunas mejoras estructurales y operativas a través de los años.

A pesar de lo anterior, sus componentes base, son los mismos originales con los que se inició la operación. El análisis de situación o estado se basará en una operación de 1 año calendario, en donde se utilizará, para determinar el diagnóstico inicial, los datos generados entre el año 2023 (antes de modernización) y 2024 (después de modernización).

1.4. Metodología

Los indicadores seleccionados para el análisis son tres métricas utilizadas en la gestión de activos: disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.

También, se desarrollará un análisis económico para cuantificar el beneficio financiero derivado de la modernización. Este cálculo se basará en el costo evitado por la reducción de horas de detención no programada, tomando como referencia el valor estimado por la organización de 55.000 USD aproximadamente por hora de detención de línea de chancado.

El estudio usará la metodología de mejora continua, incorporando el ciclo PHVA (Planificar–Hacer–Verificar–Actuar) o PCDA por sus siglas en ingles (Figura 2).

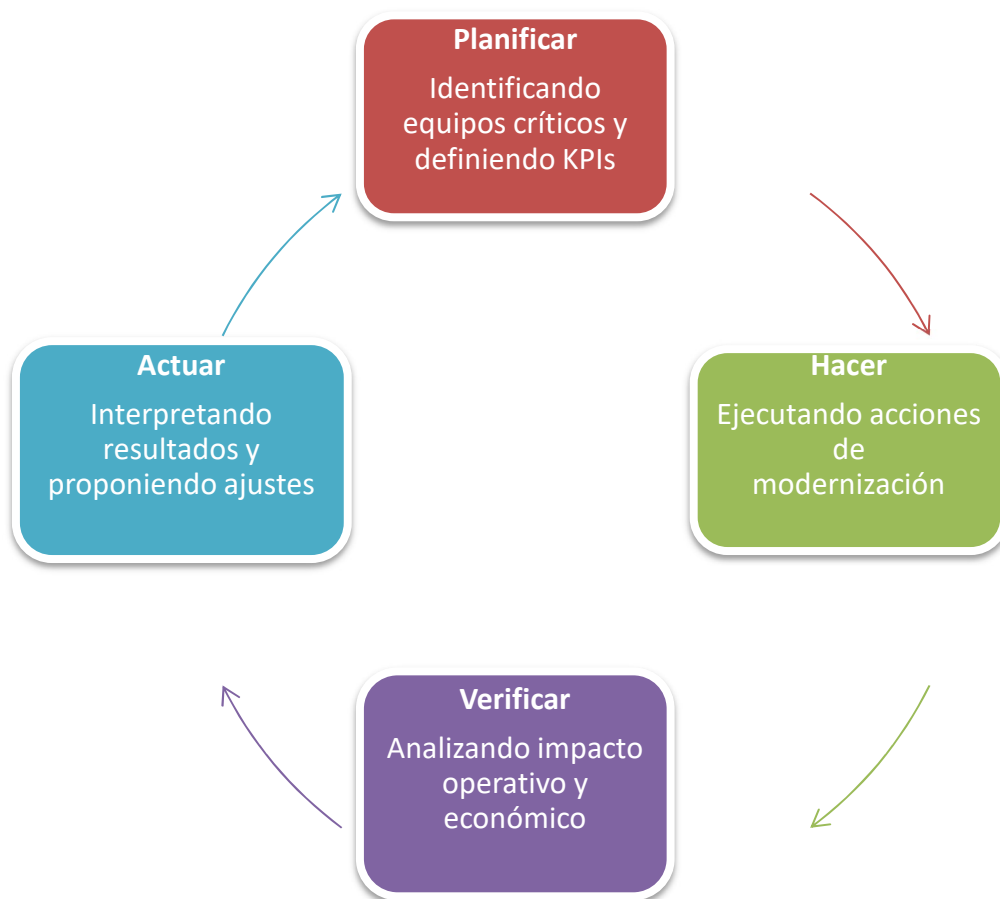
En la fase Planificar, se identifican los equipos críticos a intervenir y se definen los indicadores clave de desempeño que servirán como línea base.

En la etapa Hacer, se ejecutan las acciones de modernización, que incluyen el reemplazo físico de equipos por versiones más eficientes y confiables.

Durante la fase Verificar, se realiza un análisis comparativo de los indicadores operacionales, así como el impacto económico antes y después de la modernización, con base en datos reales extraídos de los registros operacionales.

Finalmente, en la etapa Actuar, se interpretan los resultados para proponer ajustes, estandarizar prácticas exitosas y generar recomendaciones para futuras intervenciones.

Figura 3. Esquema de metodología.



Fuente: Elaboracion propia (2025).

CAPÍTULO 2. Estado del Arte

2.1. Antecedentes

Esta sección contextualiza la investigación mediante cuatro ejes fundamentales: (1) la relevancia económica del sector minero a escala global y nacional, (2) los procesos unitarios críticos en plantas concentradoras, (3) el rol estratégico del chancado terciario en la cadena de valor, y (4) las bases técnicas de la gestión de activos y mejora continua. Estos antecedentes proporcionan el marco teórico para analizar la modernización de chancadores en la División Norte (DN), vinculando desafíos operativos con soluciones basadas en evidencia sectorial.

2.1.1. Relevancia del sector minero en la economía nacional e internacional.

La industria minera constituye un pilar fundamental en la economía global al proveer recursos esenciales para diversas cadenas productivas. En particular, el cobre destaca como un mineral estratégico debido a su amplio uso en la fabricación de dispositivos electrónicos, la construcción de infraestructura y el desarrollo de tecnologías verdes (International Copper Study Group, 2024).

Estudios del International Copper Study Group (2024) señalan que el cobre es indispensable en la manufactura de componentes electrónicos, mientras que investigaciones del International Energy Agency (2021) resaltan su relevancia para la expansión de las energías renovables. A nivel nacional e internacional, la minería constituye una fuente vital de generación de divisas. Chile, así como Perú y Australia dependen en gran medida de la explotación de sus recursos minerales; en estas naciones, minerales como el cobre, oro, plata, hierro, entre otros, representan la principal fuente de ingresos por exportaciones, lo que fortalece sus balanzas comerciales y contribuye significativamente al Producto Interno Bruto (PIB).

La relevancia de la minería se extiende también al ámbito fiscal, ya que la recaudación de impuestos, regalías y derechos de explotación financia una parte importante del presupuesto público. La relevancia de la minería se extiende también al ámbito fiscal, ya que la recaudación de impuestos, regalías y derechos de explotación financia una parte importante del presupuesto público. Según el informe Revenue Statistics 2020 de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2020), en países mineros como Chile, Australia y Canadá, los ingresos fiscales del sector representan entre el 12% y el 28% del total de recaudación nacional, sustentando programas sociales, infraestructura crítica y sistemas de protección ambiental (OECD, 2020, p. 117). Este análisis destaca que, en economías dependientes de recursos naturales, la minería contribuye 2.3 veces más al fisco que otros sectores industriales, con una elasticidad tributaria del 0.7 frente a fluctuaciones de precios de commodities (OECD, 2020, p. 89).

En el plano internacional, la minería desempeña un rol estratégico en la transición energética; minerales críticos como el litio, el cobalto y las tierras raras son fundamentales para la fabricación de baterías, vehículos eléctricos y sistemas de energía limpia. Sin embargo, el sector enfrenta desafíos considerables en sostenibilidad operativa. El consumo intensivo de recursos es crítico: la minería utiliza ~2,100 litros de agua por tonelada de mineral procesado (World Bank, 2020, p. 45), y representa el 10% del consumo energético global (IEA, 2021, p. 72), con emisiones de CO₂ equivalentes al 7% del total mundial (UNEP, 2022, p. 31). La gestión de residuos es igualmente compleja; en Chile, se generan 1.7 toneladas de relaves por tonelada de cobre producida (SERNAGEOMIN, 2023, p. 15), y solo el 5% de estos se reciclan (COCHILCO, 2024, p. 22). Paralelamente, marcos regulatorios como el Acuerdo de Escazú (CEPAL, 2021) y el Estándar IRMA para minería responsable (IRMA, 2023) exigen: (a) consulta indígena previa, (b) planes de cierre con garantías financieras, y (c) auditorías independientes de derechos

humanos, incrementando los costos de cumplimiento en un 15-20% (Moran, 2021, p. 88)

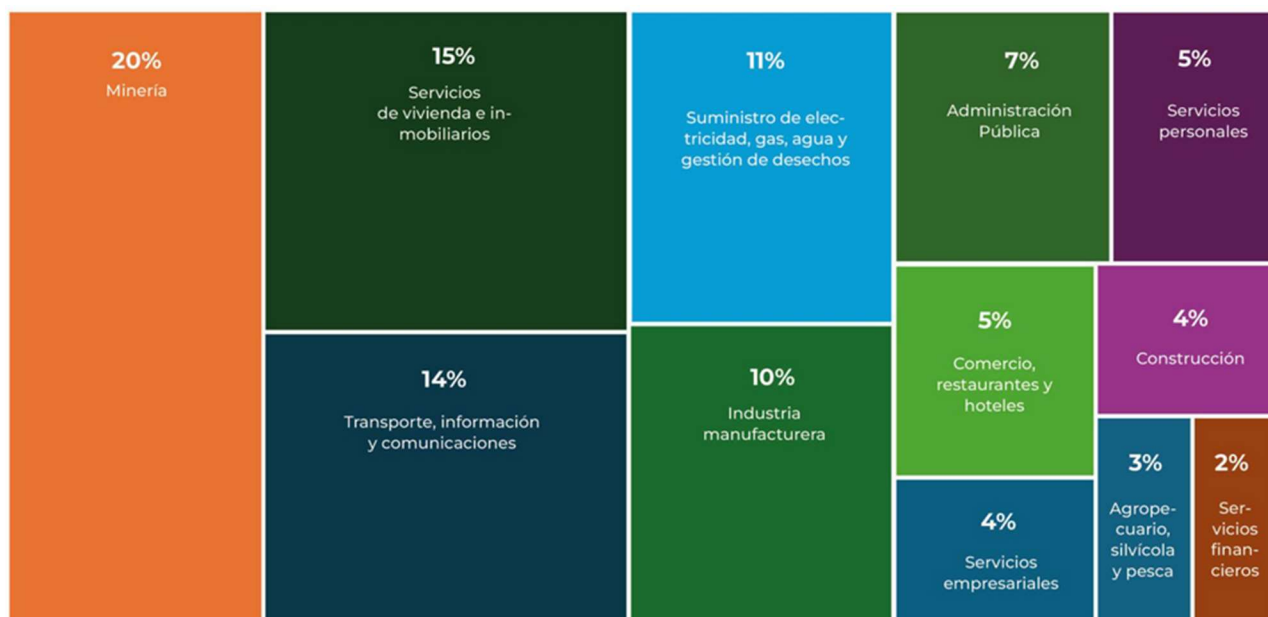
La minería sigue siendo un sector clave para el desarrollo económico global, pero su futuro dependerá de la capacidad de las empresas para adaptarse a un mundo más enfocado en la sostenibilidad y la innovación tecnológica.

En Chile—segundo productor mundial de cobre con el 26% de la oferta global (Comision Chilena del Cobre, 2024)—las operaciones mineras enfrentan una etapa de madurez crítica. Según el (Banco Central de Chile, 2024), la ley promedio del mineral ha disminuido un 35% en dos décadas, pasando de 1.2% Cu en 2000 a 0.78% Cu en 2023 (p. 24), lo que obliga a procesar 2.5 veces más roca para obtener la misma cantidad de cobre (JORQUERA, ORTIZ, & TERCEROS, 2021). Esta caída en leyes, sumada al envejecimiento de yacimientos (>50 años en Chuquicamata y El Teniente), ha elevado los costos operativos en un 42% desde 2010 (COCHILCO, 2023, p. 31), superando los USD 2.18 por libra frente a un promedio global de USD 1.75 (Wood Mackenzie, 2023). Como consecuencia, la productividad laboral minera se ha contraído un 1.8% anual entre 2018-2023 (Consejo Minero, 2024), amenazando la competitividad en un escenario de precios volátiles y transición energética

Según la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), el sector minero representó aproximadamente el 13.6 % del Producto Interno Bruto (PIB) de Chile en 2024. Este porcentaje refleja la significativa contribución de la minería, especialmente del cobre, a la economía nacional. Es importante destacar que estas cifras pueden variar anualmente debido a factores como los precios internacionales de los minerales y los niveles de producción.

La figura 4, muestra el porcentaje de participación de las principales actividades económicas en el producto interno bruto (PIB) periodos 2018 -2022 como promedios.

Figura 4. Promedio PIB por clase de actividad económica 2018 - 2022



Fuente: COCHILCO – Banco Central

Esta figura revela que ciertos sectores, como la minería, mantienen una participación alta y estable a lo largo de los años, lo que subraya su relevancia dentro del entramado económico de Chile. En contraste, sectores como la pesca muestran una participación mucho menor, lo que podría indicar limitaciones estructurales o un enfoque diferenciado en las políticas de inversión. Además, se observan fluctuaciones en la contribución de otros sectores, lo que permite identificar tendencias, cambios en la demanda y posibles impactos de políticas económicas o eventos externos.

En este contexto, las plantas concentradoras desempeñan un papel esencial en la transformación del mineral bruto, a un producto comercializable, enfrentando crecientes desafíos relacionados con la eficiencia operativa, sostenibilidad y variabilidad de las condiciones de mercado.

Esto resalta la importancia de optimizar los procesos productivos y mejorar la gestión de activos, particularmente en equipos críticos como los chancadores terciarios, que son responsables de garantizar una granulometría adecuada para las etapas posteriores de concentración, y brindar condiciones de operación seguras para todo el personal.

La seguridad del personal que opera equipos en minería es fundamental para prevenir accidentes, proteger la vida de los trabajadores y garantizar la continuidad operativa. Como señala Nakajima (Nakajima, 1988), un ambiente seguro no solo reduce interrupciones por incidentes —mejorando la productividad— sino que también evita pérdidas económicas asociadas a paralizaciones, reparaciones o sanciones regulatorias. La Continuidad operativa y eficiencia, en un ambiente seguro reduce interrupciones por incidentes, mejorando la productividad, evita pérdidas económicas asociadas a paralizaciones, reparaciones o sanciones (Soto M. V., 2021).

En esencia, la seguridad operativa es indispensable para salvaguardar al capital humano, optimizar la eficiencia y asegurar el cumplimiento normativo en la industria minera.

2.1.2. Principales procesos unitarios en minería (concentración, chancado, molienda).

El objetivo de los procesos de reducción de tamaño es la liberación del mineral para llegar a obtener un tamaño de partícula tal que entregue el máximo valor económico esperado y aumentar el área superficial para reacciones químicas. La reducción de tamaño puede comenzar con rocas de hasta 1 metro de largo llegando a tener como producto final partículas en micrones, es por esto que es necesario contar con varias etapas y equipos específicos para poder llevar a cabo la reducción de la roca.

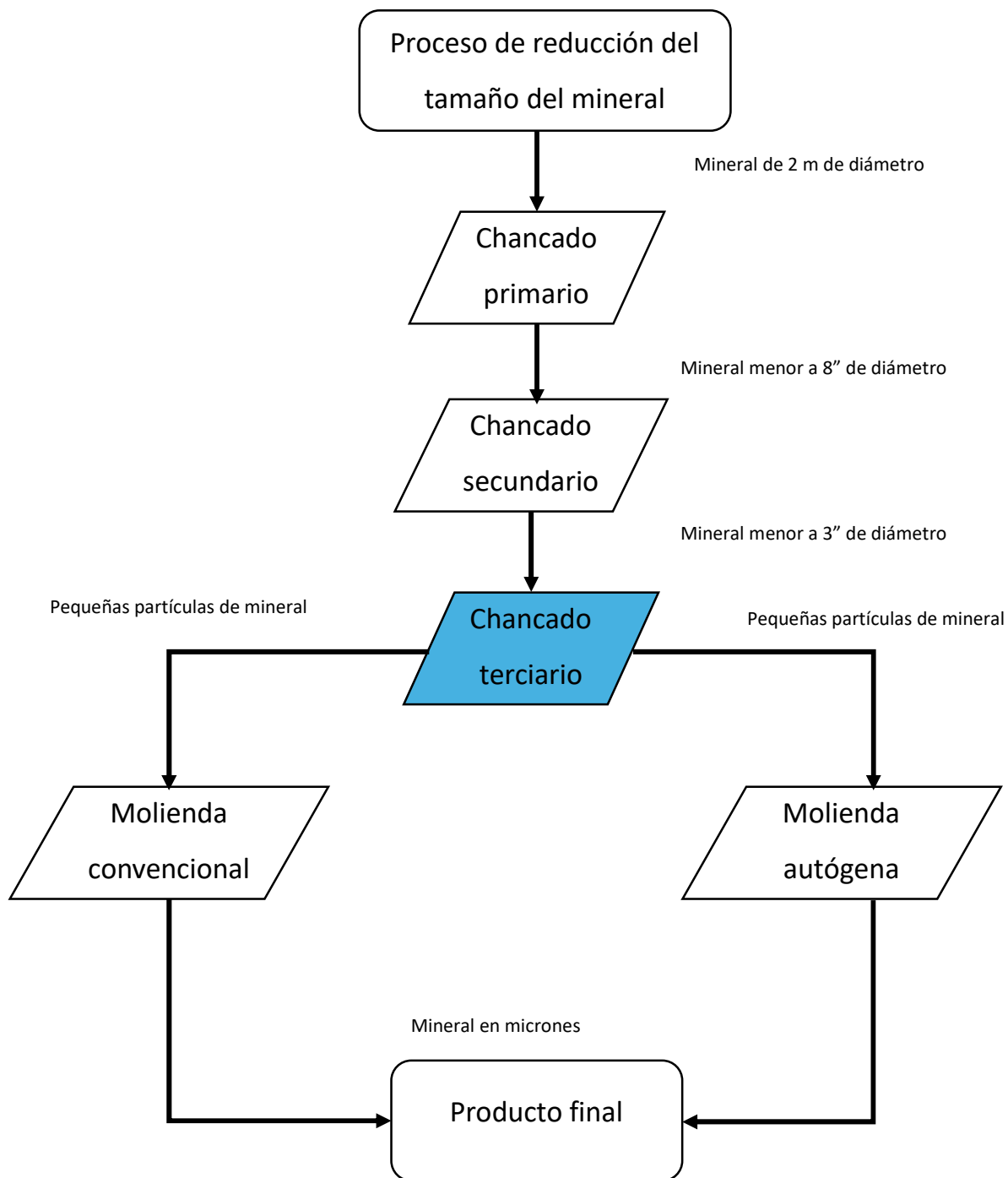
Normalmente las etapas de reducción se pueden dividir en función del tamaño de partícula de entrada y salida; los procesos de chancado se utilizan para partículas gruesas provenientes directamente de la mina con diámetros mayores a 2"; luego, los procesos de molienda son alimentados con partículas de diámetro menores a 1/2" para la molienda convencional.

La etapa de chancado del mineral suele dividirse de acuerdo con el tamaño que procesan, encontrándose chancado primario (1 a 2 [m]), chancado secundario (menores a 8"), y chancado terciario (menores a 3"). El tamaño del producto que va a molienda va a depender del tipo de molienda de la planta.

La etapa de molienda se realiza en equipos cilíndricos que giran alrededor de su eje horizontal y se utiliza algún medio de molienda como bolas o barras de acero.

Existen dos tipos comunes de molienda, por un lado, se encuentra la molienda convencional la cual cuenta con molinos de bolas y/o barras, y por otro está la molienda autógena o semiautógena. La principal diferencia entre estas está en que la molienda AG utiliza como medio de molienda el mineral, mientras que la molienda SAG utiliza como medio el mineral con un cierto porcentaje de bolas. (Godoy, 2019). Estos procesos garantizan la producción eficiente de concentrados minerales listos para fundición o comercialización. La figura 5 muestra en forma esquemática el flujo de operaciones en base al proceso productivo.

Figura 5 Esquema proceso de chancado y molienda



Fuente: Elaboración propia (2025)

2.1.3. Caracterización de la Empresa / División

2.1.3.1. Capacidad instalada y estructura del área de chancado.

La planta concentradora de la Corporación Minera División Norte (DN) cuenta con un área de chancado diseñada para reducir el gran tamaño de las rocas extraídas en la mina y preparar el mineral para etapas posteriores de procesamiento. La capacidad instalada de este sector es crucial para garantizar un flujo continuo y eficiente que cumpla con los volúmenes diarios de toneladas requeridas por la operación. En plantas concentradoras, la fase inicial de chancado se realiza con equipos capaces de procesar mineral de gran tamaño, reduciéndolo de dimensiones que pueden alcanzar hasta 1 metro de largo a partículas de aproximadamente 178 [mm] en el producto primario.

Este proceso se lleva a cabo mediante chancadores giratorios, los cuales se encargan de disminuir el tamaño del mineral, facilitando su transporte mediante cintas y abriendo el camino para procesos ulteriores. El foso de descarga del área está diseñado para recibir grandes volúmenes, permitiendo la llegada simultánea de varios camiones, lo que evidencia una infraestructura robusta destinada a manejar una capacidad instalada que puede superar las decenas de miles de toneladas diarias (Tintaya Antapaccay, 2020).

La estructura del área de chancado se compone de múltiples etapas de reducción de tamaño, integrando equipos primarios, secundarios y terciarios. Tras el chancado primario, en el que se reduce inicialmente el tamaño del mineral, se utilizan equipos secundarios y terciarios para lograr una granulometría fina que posibilite una alimentación adecuada a la molienda. Esta organización en cascada se apoya en sistemas auxiliares, tales como alimentadores, grizzlies, transportadores y harneros vibratorios, encargados de clasificar y reciclar el material que aún no cumple con las especificaciones del proceso.

En esta etapa del proceso, se estará haciendo énfasis en los equipos pertenecientes al proceso de chancado terciario, lugar donde se realizó la modernización de equipos y del cual se cuenta con base de datos de operaciones de mantenimiento, adecuadas para el análisis posterior.

2.1.3.2. Objetivos estratégicos en cuanto a productividad y eficiencia operativa.

La Corporación Minera División Norte orienta sus estrategias operativas hacia la maximización de la productividad y la eficiencia, estableciendo objetivos estratégicos que permiten responder a las exigencias de un mercado global cada vez más competitivo. Uno de los principales objetivos es cumplir los estándares de seguridad operacional. Además, optimizar la utilización de los recursos, tanto humanos como tecnológicos, mediante la implementación de sistemas de gestión avanzados y la integración de tecnologías digitales en los procesos operativos. La implantación de metodologías de mejora continua, inspiradas en filosofías como Lean Management y en modelos de excelencia operacional, ha permitido a la organización desarrollar iniciativas que optimizan el uso de equipos, reducen tiempos improductivos y aumentan la disponibilidad de la planta concentradora. (CODELCO, 2021)

Otro objetivo estratégico fundamental consiste en potenciar la competitividad mediante la reducción de los costos operativos y la mejora en la calidad del concentrado mineral. Para ello, la organización ha desarrollado programas de capacitación y benchmarking, que facilitan el intercambio de mejores prácticas entre diferentes áreas operativas y la implementación de tecnologías emergentes, como sistemas de monitoreo en tiempo real y análisis de datos.

2.1.4. Importancia estratégica del proceso de chancado en la cadena de valor.

En el contexto de la planta concentradora de la Corporación Minera División Norte (DN), los chancadores terciarios desempeñan un rol fundamental en el proceso de reducción de tamaño del mineral para asegurar la eficiencia de las etapas posteriores de concentración.

Estos equipos, diseñados para operar bajo condiciones de alta exigencia, cuentan con especificaciones técnicas que incluyen capacidades de procesamiento de hasta 500 toneladas por hora y configuraciones ajustables para alcanzar tamaños de partícula definidos.

Históricamente, los chancadores terciarios han enfrentado problemas de fallas mecánicas y eléctricas que han afectado su desempeño (Bravo, 2017). Los datos recopilados muestran un incremento en la frecuencia de fallas críticas durante los últimos cinco años, asociado principalmente al desgaste de componentes clave, componentes mayores, sistemas de transmisión y sistemas auxiliares. Las acciones de mantenimiento implementadas han mostrado avances, aunque persisten desafíos significativos.

Los problemas frecuentes de este tipo de chancadores podrían tener algunos orígenes únicos. Poniendo especial atención a la geometría y dimensiones de los componentes principales del equipo, se podría resolver los problemas indicados anteriormente (Bugueño Muñoz, 1991).

También, es importante recalcar respecto a las reparaciones mayores que se realizan a estos componentes principales, las cuales no son de una calidad necesaria, lo que impacta en la confiabilidad del equipo, ya que la duración de estos componentes reparados es baja (Godoy Jorquera, 1995).

Como se desprende del análisis bibliográfico, las problemáticas de desgaste acelerado, fatiga estructural y fallas recurrentes en componentes críticos (como bujes, excéntricas y "postes") no son exclusivas de los chancadores Symons de la División Norte, sino que constituyen una constante documentada en equipos análogos de la industria minera. Estas dificultades se han observado en chancadores de cono de configuración y antigüedad similares, tales como los modelos Nordberg HP series y Metso MP1000, operando en instalaciones comparables por su tonelaje procesado y condiciones de operación (p. ej., plantas concentradoras de gran escala como Minera Escondida Ltda. o Los Pelambres de Antofagasta Minerals) (Soto M. &, 2018). La recurrencia de estos modos de falla en contextos operativos equivalentes valida la aplicabilidad de las referencias consultadas —que abordan casos específicos en la minería chilena— para el diagnóstico y análisis de la situación actual en la planta de estudio.

2.1.5. Antecedentes sobre Gestión de Activos en la Industria Minera

En la industria minera la gestión de activos físicos en plantas concentradoras ha sido objeto de numerosos estudios académicos, lo que refleja la importancia de contar con sistemas robustos y estrategias integrales en el mantenimiento y administración de equipos críticos. Diversos estudios han documentado casos exitosos y propuestas de mejora, como el caso de Herrera (2023), donde analiza el estado actual de la gestión en una empresa minera y diseña una estrategia orientada a la integración de indicadores de desempeño, implantación de tecnologías emergentes y metodologías de mejora continua. El estudio plantea que la consolidación de un sistema operativo integrado es esencial para reducir tiempos de inactividad, optimizar el uso de recursos y apoyar la toma de decisiones mediante sistemas de información precisos y actualizados.

Otro caso, fue el de Medina (2024) donde se centra en la identificación y análisis de indicadores clave (KPI) que permiten medir la confiabilidad,

disponibilidad y eficiencia operacional de los activos en una planta concentradora. Este trabajo enfatiza la importancia de implementar sistemas de monitoreo en tiempo real y la utilización de metodologías basadas en análisis estadísticos para detectar fallas potenciales, optimizar operaciones y reducir costos asociados a reparaciones no planificadas. La tesis de Medina evidencia que, mediante la integración de indicadores operativos, es posible establecer modelos predictivos que orienten las estrategias de mantenimiento y hagan más eficiente la gestión de equipos críticos.

Adicionalmente, estudios como el de Salas (2016) se han enfocado en el análisis técnico-económico de la vida útil de los activos, que considera aspectos como el valor económico, la rentabilidad de la inversión y la determinación del momento óptimo para el reemplazo; compara modelos de mantenimiento correctivo versus predictivo fundamentados en datos reales extraídos de operaciones de plantas concentradoras, lo que permite contrastar diferentes estrategias de gestión de activos.

La evidencia recopilada sugiere que la inversión en sistemas de gestión de activos integrados, sistema moderno e integrado para gestionar los equipos permite que la empresa produzca más, gaste menos en arreglos, y detecte problemas antes de que ocurran fallas serias que puedan detener la operación, no solo mejora los índices de producción, sino que también reduce significativamente los costos operativos al anticipar y prevenir fallas antes de que se conviertan en problemas críticos.

2.1.5.1. Desafíos en la operación y mantenimiento de chancadores.

Los chancadores son equipos fundamentales en el proceso de reducción de tamaño del mineral, situándose en una posición crítica para garantizar la continuidad de la cadena productiva en la industria minera. Sin embargo, su operación y mantenimiento enfrentan una serie de desafíos operativos y técnicos que han sido

objeto de estudio en diversas tesis. Farfán (2014) detalla que el chancador primario opera bajo condiciones extremas, enfrentando altos niveles de abrasión y cargas mecánicas intensas, lo cual acelera el desgaste de componentes como cojinetes, placas y puggas. La naturaleza variable del mineral, en cuanto a dureza y tamaño, añade una complejidad adicional al establecimiento de un plan de mantenimiento adecuado, ya que la frecuencia y metodología de las intervenciones pueden variar significativamente según las condiciones de operación.

Por otro lado, Zavala (2018) analiza la aplicación de la metodología de causa raíz en un contexto operativo real. El análisis revela que, aunque la adopción de RCM permite identificar de manera anticipada los modos de fallo, su implementación requiere una inversión en sistemas de monitoreo y en capacitación especializada del personal. Aunque la tesis no realiza un análisis económico detallado de la inversión (con cifras de retorno), sí fundamenta que implementar RCM es una decisión estratégica que mejora el desempeño del equipo y reduce los costos totales de mantenimiento a largo plazo, lo cual se puede justificar como una inversión con retorno positivo. La necesidad de recopilar y procesar datos en tiempo real para predecir el comportamiento de los equipos representa uno de los mayores retos en la integración de esta tecnología en las plantas mineras.

Además, la coordinación entre el equipo operativo y los encargados del mantenimiento se identifica como otro desafío significativo. La ausencia de protocolos estandarizados, la comunicación ineficaz y la demora en la respuesta ante anomalías pueden conllevar a paradas prolongadas del sistema. Estas interrupciones no solo afectan la productividad inmediata, sino que también incrementan los costos operativos en forma acumulativa. Asimismo, las condiciones ambientales en las que operan los chancadores, tales como la presencia de polvo y la exposición a temperaturas extremas, afectan la fiabilidad de los sensores y otros dispositivos de monitoreo, complicando la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo.

Finalmente, se resalta la importancia de la planificación y la ejecución oportuna del mantenimiento para mitigar los efectos adversos de las fallas en los chancadores. La aplicación de técnicas de análisis de fallas, como el FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), permite identificar los componentes críticos y establecer estrategias preventivas que contribuyen a prolongar la vida útil del equipo.

2.1.6. Uso del Ciclo PHVA en la Mejora Continua de Activos

2.1.6.1. Aplicaciones del ciclo Deming en entornos industriales.

Este enfoque se basa en la formulación de un plan (Plan) para abordar un problema identificado, la ejecución del plan (Do) en condiciones controladas, la verificación de los resultados obtenidos (Check) y la adopción de medidas correctivas o de estandarización (Act) para impulsar nuevas oportunidades de mejora. En entornos industriales, el ciclo Deming se ha convertido en una herramienta fundamental para la optimización de procesos, la reducción de desperdicios y la mejora de la calidad (Isniah, 2020).

En la fase de "Plan", se identifican los problemas o áreas de oportunidad mediante el análisis de datos, la realización de auditorías, el uso de herramientas estadísticas y diagramas de flujo, entre otras técnicas. Este enfoque permite definir objetivos claros y medibles, establecer indicadores de desempeño e identificar las variables críticas que afectan el rendimiento del proceso. Por ejemplo, en una línea de producción automotriz se pueden identificar cuellos de botella en el ensamblaje o variaciones en la calidad de componentes subcontratados; en ambos casos, se desarrollan propuestas de mejora que se ponen a prueba en la siguiente fase.

La etapa "Do" consiste en implementar los cambios planeados en un entorno controlado o a pequeña escala, lo que permite probar la viabilidad de las soluciones sin afectar de forma masiva la producción. En industrias de fabricación y

procesamiento, esta fase se acompaña de la formación del personal en los nuevos procedimientos, la utilización de pilotos o pruebas de concepto y la integración de tecnologías avanzadas, como sistemas de automatización o sensores de monitoreo, que facilitan la recolección de datos en tiempo real.

La fase "Check" o "Verificar" es crítica, ya que implica la evaluación y el análisis de los resultados obtenidos tras la ejecución del plan. En entornos industriales se utilizan herramientas como el análisis de causa raíz, el control estadístico del proceso (SPC) y el benchmarking para determinar si las modificaciones han generado las mejoras esperadas. Este monitoreo constante permite detectar desviaciones, ajustar los parámetros operativos y validar la efectividad de la solución implementada.

Finalmente, la fase "Act" se centra en estandarizar las mejoras logradas o, en caso de resultados insuficientes, en redefinir el plan de acción para iniciar un nuevo ciclo. La iteración constante del ciclo PHVA permite que las organizaciones industriales se adapten dinámicamente a cambios en la demanda del mercado, actualicen sus procesos y mantengan niveles elevados de eficiencia y calidad. Esta retroalimentación es esencial para la transformación cultural dentro de las empresas, fomentando un ambiente de aprendizaje continuo e innovación (Lean Manufacturing, 2019).

2.1.6.2. Implementación práctica en proyectos de mejora en minería.

La implementación práctica del ciclo PHVA en proyectos de mejora minera ha optimizado la productividad, la utilización de recursos, la reducción de tiempos de inactividad y la garantía de condiciones seguras para los trabajadores (Arzapalo, 2020; Díaz, 2021; Moyano y Villamil, 2021).

En la fase inicial, se realiza un diagnóstico de la situación actual. Esto implica la recopilación de datos históricos, el análisis de indicadores clave (como la

disponibilidad de equipos, la producción, la tasa de fallos y los tiempos de ciclo) y la identificación de áreas susceptibles de mejora.

La fase de "Hacer" consiste en la implementación a pequeña escala de las soluciones propuestas, que puede incluir desde ajustes en la programación del mantenimiento, la incorporación de nuevos equipos o tecnologías, hasta la reorganización de los procesos de operación.

La etapa "Verificar" es fundamental para evaluar si las mejoras implementadas han alcanzado los objetivos planteados, se aplican métodos de análisis estadístico, auditorías visuales y revisiones de indicadores operativos para evaluar la eficacia de las acciones ejecutadas. Durante esta etapa se realizan comparaciones entre los resultados actuales y los históricos, verificándose la reducción de paradas no planificadas, el incremento de la producción o la mejora en la seguridad operativa. Además, se recogen las observaciones del personal operativo y se integran en la evaluación, lo que permite afinar aún más el proyecto de mejora.

Por último, en la fase "Actuar" (Actuar), la estandarización se traduce en la actualización de protocolos operativos, la capacitación continua del personal y la integración de nuevos indicadores de desempeño en los sistemas de gestión. De esta forma, el ciclo se vuelve reiterativo, permitiendo que cada iteración aporte mayor conocimiento y se aproxime a una solución óptima en términos de productividad y seguridad (Arzapalo, 2020).

2.1.6.3. Casos documentados y buenas prácticas.

Uno de los estudios destacables es la realizada por Arzapalo (2020) donde documenta cómo la metodología fue adoptada para optimizar el cumplimiento del plan de avances en una operación minera, resultando en un incremento significativo en la adherencia al plan y una mejora en la gestión del tiempo de actividad de los

equipos. Se detalla la fase de diagnóstico, la aplicación de pilotos y la evaluación de los resultados para finalmente estandarizar las mejoras alcanzadas. La metodología permitió además identificar cuellos de botella y problemas operacionales que se pudieron abordar de manera oportuna.

Otro caso fue el presentado por Díaz (2021), donde el enfoque principal se centra en la reducción de costos en la industria manufacturera, y los principios aplicados son altamente transferibles a entornos mineros, donde la reducción de costos y la optimización de procesos son igualmente críticos.

El estudio evidencia que la implementación exitosa del ciclo PHVA en entornos mineros depende críticamente de tres elementos interconectados:

1. Sistemas integrados de monitoreo, que permiten capturar variables operativas clave (vibraciones, temperatura, flujos) mediante sensores IoT, facilitando la detección temprana de desviaciones (Herrera, 2023).
2. Recopilación de datos en tiempo real, la cual, según Díaz (2021), transforma información histórica en indicadores accionables (ej.: OEE, MTBF), reduciendo la latencia en la toma de decisiones en un 60% .
3. Participación transversal de todos los niveles jerárquicos, desde operarios hasta gerencia, creando una cultura de mejora continua donde el conocimiento tácito se institucionaliza mediante comités PHVA mensuales (Arzapalo, 2020).

Esta sinergia garantiza que cada iteración del ciclo —especialmente en las fases Verificar y Actuar— genere mejoras palpables: incrementos del 15-23% en eficiencia operativa, reducciones del 40% en tiempos de inactividad no planificada, y disminuciones del 30% en incidentes de seguridad (Moyano & Villamil, 2021).

Además, existe un estudio publicado en la Revista Politécnica por Moyano y Villamil (2021) que recopila evidencias y casos de implementación del ciclo PHVA en distintos sectores y analiza detalladamente su impacto en la mejora continua de procesos. La revisión abarca ejemplos de proyectos en la industria minera, manufactura y sectores de servicios, mostrando cómo la aplicación metódica del ciclo PHVA permite no solo la detección temprana de problemas, sino también la implementación de soluciones escalables y sostenibles.

2.1.7. Resumen de antecedentes y su articulación con los objetivos del estudio

En síntesis, la revisión de antecedentes realizada establece el contexto macroeconómico, operativo y teórico esencial para enmarcar esta investigación. Se ha demostrado que la industria minera, pilar de la economía chilena, enfrenta presiones crecientes por la disminución de las leyes del mineral y el aumento de los costos operativos (Consejo Minero, 2024). En este escenario, la optimización de procesos críticos, como el chancado terciario, se transforma en una necesidad estratégica para mantener la competitividad. Los fundamentos expuestos sobre gestión de activos, los desafíos específicos de los chancadores Symons y la metodología PHVA proporcionan el marco de referencia necesario para diagnosticar, intervenir y evaluar el impacto de una modernización. La siguiente tabla resume la articulación directa entre los ejes temáticos revisados y los objetivos

planteados en esta tesis, evidenciando cómo el estado del arte sustenta y da direccionalidad al estudio.

Tabla 2. *Articulación de los Antecedentes Revisados con los Objetivos de la Tesis.*

Aspecto tratado en los Antecedentes	Aporte a los Objetivos de la Tesis
Relevancia económica del sector minero (COCHILCO, 2024; OECD, 2020)	Justifica la investigación: Establece la criticalidad de maximizar la eficiencia operativa en un sector clave para la economía nacional, proporcionando el contexto macro que valora económicamente las mejoras en disponibilidad y confiabilidad.
Procesos unitarios (chancado terciario) (Godoy, 2019)	Contextualiza el objeto de estudio: Define la función estratégica del chancado terciario dentro de la cadena de valor minera, permitiendo enfocar el diagnóstico y el análisis en la etapa correcta y sus equipos críticos.
Caracterización de la empresa y su capacidad instalada	Delimita el alcance del estudio: Proporciona los datos específicos de la planta en que se implementa el caso de estudio (DN), permitiendo un análisis situado y relevante para la organización.
Gestión de Activos en la Industria Minera (Herrera, 2023; Medina, 2024; Salas, 2016)	Proporciona el marco teórico-metodológico: Ofrece los conceptos clave (KPIs, MTBF, MTTR, criticidad) y casos de éxito que fundamentan la metodología de análisis de datos y evaluación de impacto utilizada.
Desafíos en operación y mantenimiento de chancadores (Farfán, 2014; Zavala, 2018)	Sustenta el diagnóstico: Describe problemáticas comunes y validadas en equipos similares (ej., chancadores Nordberg, Metso MP1000 en Escondida o Los Pelambres), lo que permite contrastar y validar las causas raíz identificadas en los chancadores de DN.
Ciclo PHVA y mejora continua (Arzapalo, 2020; Isniah, 2020; Moyano & Villamil, 2021)	Define la metodología de intervención: Provee un marco estructurado y probado en minería para planificar la modernización, ejecutarla, verificar sus resultados y estandarizar las mejoras, alineándose directamente con el Objetivo General y los Específicos.

Fuente: Adaptado de "Implementación del Ciclo PHVA en la mejora del cumplimiento del plan mensual de avances - AESA RAURA," por P. Arzapalo, 2020.

2.2. Marco Teórico

En esta sección se fundamentan las necesidades teóricas a tomar en cuenta en el desarrollo de la tesina. Primeramente se realiza un enfoque en gestión de activos físicos, en la cual se exploran los principios y modelos que sustentan la administración efectiva de recursos tangibles. Este apartado profundiza en el papel crucial que juegan los indicadores clave en la medición de la eficiencia y la efectividad de los activos, permitiendo un análisis objetivo de su desempeño y facilitando la toma de decisiones estratégicas. Asimismo, se aborda la evaluación de la criticidad, una herramienta imprescindible para priorizar y asignar recursos de manera óptima, identificando aquellos activos que tienen un impacto más significativo en la operación global. La incorporación del ciclo PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) en este contexto refuerza la idea de un proceso iterativo y sistemático orientado a la mejora continua, ya que cada fase del ciclo contribuye a generar aprendizajes, ajustar estrategias y consolida mejoras en la gestión y mantenimiento de los activos.

En este marco, la aplicación de metodologías estructuradas como el ciclo PHVA se complementa de manera natural con los lineamientos de la Norma ISO 55001, ya que ambos comparten el propósito de fomentar una gestión de activos proactiva y basada en la mejora continua.

La Norma ISO 55001 al tener un enfoque en la mejora continua, impulsa a las organizaciones a implementar mecanismos de planificación, seguimiento y actuación que permitan optimizar el desempeño de sus activos, reducir costos y elevar la confiabilidad operativa. En este sentido, la norma no solo orienta a nivel teórico, sino que también se traduce en un conjunto de procesos y procedimientos aplicables en la práctica para enfrentar los desafíos de un entorno productivo cada vez más exigente.

2.2.1. Indicadores Clave en la Gestión de Activos

Para evaluar la efectividad de una estrategia de mantenimiento, se requiere un enfoque sistemático basado en indicadores clave de desempeño (KPIs) y otros métodos de análisis que reflejen cómo el mantenimiento contribuye a los objetivos operativos y financieros de la planta (Mobley, 2002).

Se comienza con el análisis determinando las disponibilidades de los equipos, definida conceptualmente como:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

Donde el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF, por sus siglas en inglés, Mean Time Between Failures) es una métrica utilizada para evaluar la confiabilidad de un sistema o proceso. Se calcula dividiendo el tiempo total de operación por el número de fallas ocurridas (Crespo, 2007).

Volviendo a la disponibilidad, si se usa la definición establecida por Crespo (2007), “La disponibilidad será la porción de tiempo que el equipo esté en buenas condiciones para cumplir su función, independientemente de si se utiliza o no”.

Se puede determinar el MTBF utilizando las horas de detenciones no programadas y el número total de fallas de la siguiente manera:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo Total de Operación}}{\text{Número Total de Fallas}} \quad (2)$$

El MTBF es una medida importante de la confiabilidad del sistema. Un MTBF más alto indica una mayor confiabilidad, ya que significa que el sistema tiende a funcionar durante más tiempo entre fallas (Crespo, 2007).

Para determinar el Tiempo Medio de Reparación (MTTR, por sus siglas en inglés, Mean Time To Repair) utilizando las horas de detenciones no programadas:

$$MTTR = \frac{\textit{Tiempo Total de Detenciones No Programadas}}{\textit{Numero Total de Detenciones No Programadas}} \quad (3)$$

El MTTR proporciona una medida promedio del tiempo que se tarda en reparar una falla o resolver un problema después de que ocurre. Un MTTR más bajo indica que el equipo de mantenimiento es eficiente en la resolución de problemas y en la restauración del sistema a la operación normal (Crespo, 2007).

Wireman (2004) destaca que, sin una comparación objetiva de los indicadores, es imposible saber si las estrategias aplicadas realmente agregan valor al proceso. Además, esto genera confianza en las decisiones tomadas y permite justificar inversiones futuras. Comparar el rendimiento de los KPI's antes y después de implementar la estrategia de mantenimiento es fundamental para medir su impacto, lo que puede incluir:

- Tendencias de fallas: Comparar las tasas de fallas previas y posteriores a la estrategia para verificar una reducción.
- Impacto en el tiempo de producción: Observar si los tiempos de parada no planificada se reducen tras la implementación.
- Análisis de costo-beneficio: Evaluar los ahorros en costos operativos frente a la inversión en mantenimiento.

2.2.2. Reemplazo de equipos

Este desarrollo, se realiza bajo los siguientes enunciados:

- **Obsolescencia tecnológica:** Si el equipo ya no cumple con los estándares actuales de producción o eficiencia, y su tecnología ha quedado rezagada, lo que impide la optimización de los indicadores de rendimiento (como disponibilidad o confiabilidad). "La obsolescencia tecnológica compromete indicadores de rendimiento (disponibilidad, confiabilidad) al limitar la integración con sistemas de monitoreo modernos y nuevas exigencias productivas" (Mobley, 2002) .
- **Costos crecientes de mantenimiento:** Evaluar el costo del ciclo de vida (LCC, por sus siglas en inglés) del equipo. Si los costos de mantenimiento acumulados y proyectados son mayores que el costo de adquisición de un equipo nuevo es momento de considerar el reemplazo (Crespo, 2007).
- **Baja confiabilidad o alta frecuencia de fallas:** Si el equipo presenta fallas recurrentes que afectan la disponibilidad operativa y el MTBF, y las soluciones de mantenimiento no logran revertir esta situación.
- **Impacto en la producción:** Cuando las fallas frecuentes del equipo causan paradas no programadas que afectan gravemente los niveles de producción y los costos asociados.
- **Tiempos de reparación prolongados:** Si la reparación del equipo depende de repuestos obsoletos o de difícil acceso, lo que incrementa el tiempo promedio de reparación (MTTR). "Cuando el costo de almacenamiento de repuestos discontinuados supera el 25% del valor residual del equipo, la sustitución es la solución óptima" (Mobley, 2002).

2.2.3. Evaluación de Criticidad

El análisis de criticidad basa su modelo en la determinación de los impactos de la falta originada por cada equipo o componente, a través de la obtención de la indisponibilidad (Arata, 2013).

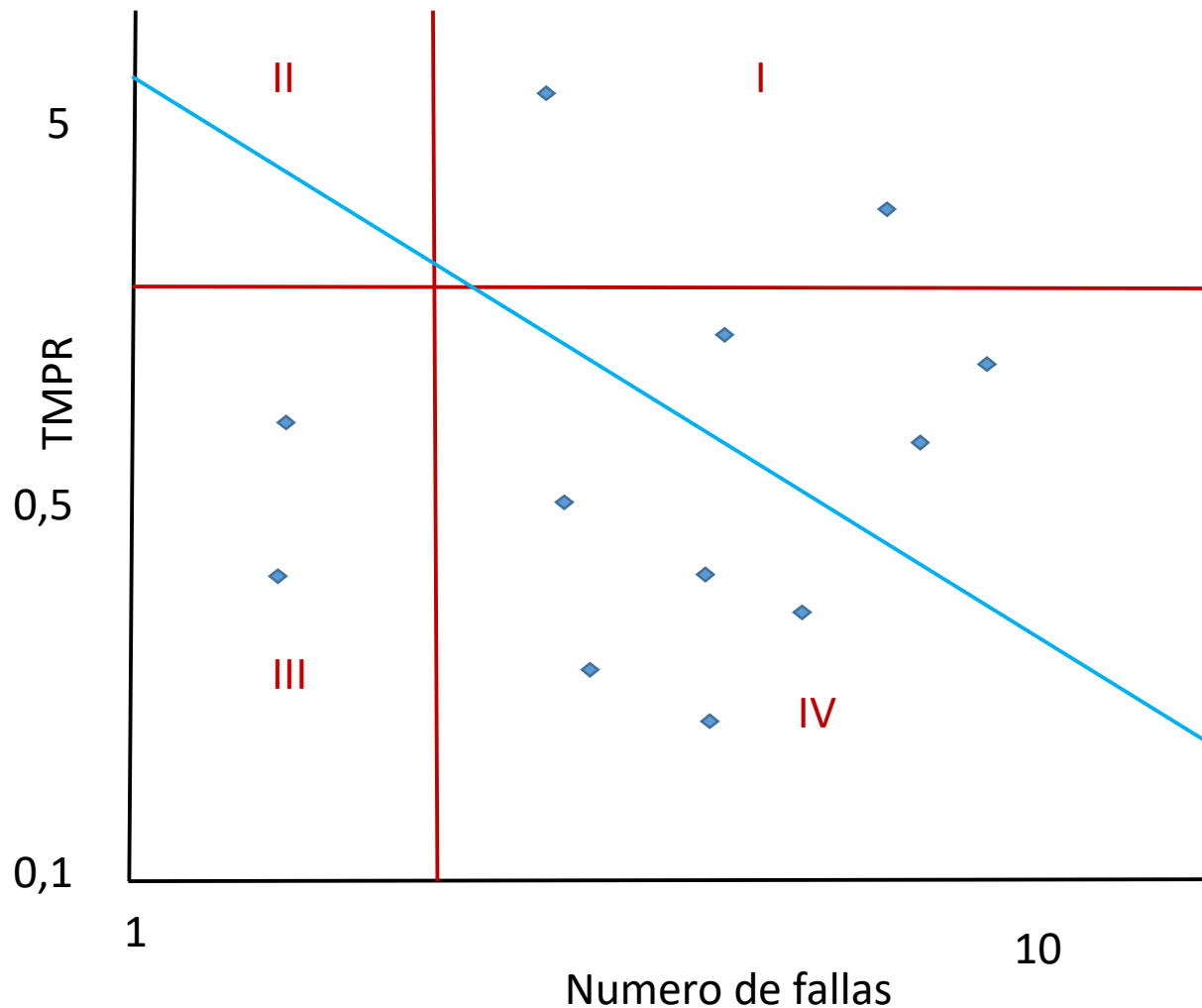
El análisis de criticidad de los activos indica que deben ser clasificados como críticos, esto utilizando el método Jack Knife, que permitirá identificar los equipos o los componentes a los cuales se deben asignar mayor interés y solicitar implementar programas de mantenimientos especiales y asignar recursos adicionales para asegurar el máximo de disponibilidad del activo finalmente seleccionado.

Para facilitar la identificación de los equipos, componentes o modos de falla se dispone de herramientas de soporte gráfico como: gráficos de dispersión (lineal y logarítmica), diagramas de Pareto, diagrama Jack Knife y la gráfica Nelson-Aalen, matriz de indisponibilidad y consecuencia, entre otros (Arata, 2013).

El método de análisis Jack-Knife es un estudio multicriterio que evalúa variables relacionadas con los modos de falla, como la frecuencia de ocurrencia (tasa de falla promedio), tiempo fuera de servicio (MTTR) y costos.

Este análisis se representa en un diagrama de dos o más dimensiones, donde cada dimensión es una variable de estudio. Si se usan frecuencia y tiempo fuera de servicio, el gráfico se divide en cuatro cuadrantes según los promedios de estas variables. Los modos de falla en el primer cuadrante tienen frecuencias y tiempos de inactividad superiores al promedio, siendo críticos. Además, se pueden añadir líneas de iso-indisponibilidad para identificar modos de falla que excedan niveles deseados, usando escalas logarítmicas para mantener las líneas rectas.

Figura 6 Esquema de Diagrama Jack-Knife



Fuente: Thiago Pimentel (Publicación LinkedIn 2025).

- Cuadrante I - Elementos que se consideran críticos y crónicos. En otras palabras, a aquellos a los que se deba prestar más atención. En este caso, es necesario verificar el procedimiento para reducir el tiempo de mantenimiento y verificar el motivo del elevado número de fallas.

- Cuadrante II: Elementos que son agudos (críticos) porque tienen un tiempo elevado para repararse. Es interesante comprobar los procedimientos para reducir el tiempo de mantenimiento.
- Cuadrante III: La "zona ideal" donde se tiene un bajo número de fallas y un bajo tiempo de reparación.
- Cuadrante IV: Artículos que fallan con alta frecuencia pero tienen un tiempo de reparación bajo. Es necesario identificar el motivo del elevado número de fallos.

2.2.4. Ciclo PHVA Aplicado a la Gestión de Activos

El Ciclo Deming, también conocido como Ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar), utiliza una metodología de mejora continua basada en el enfoque de gestión de calidad. Fue creada y definida por primera vez en la década de 1930 por el experto en estadística estadounidense Walter A. Shewart. Luego, en la década de 1950, fue desarrollado por W. Edwards. Deming y se convirtió en uno de los métodos más conocidos en el mundo para guiar la mejora (Silva, Medeiros, & Vieira, 2017).

"El Ciclo PDCA es una herramienta fundamental para estructurar y mejorar procesos de manera sistemática y continua" (Deming, 1986).

Esta metodología sigue cuatro pasos secuenciales que permiten identificar problemas, implementar soluciones, verificar resultados y actuar sobre ellos para lograr mejoras sostenibles en los procesos. Se comienza realizando un diagnóstico de la situación actual (PLAN), recopilando datos históricos de desempeño de los equipos chancadores de cono terciarios. Esto incluye registros de fallos, tiempos de inactividad, mantenimiento realizado, producción y cualquier otro dato relevante que permita entender el estado actual de los equipos y su gestión. Se usarán técnicas de recolección de datos como entrevistas con el personal, revisión de registros SAP, y sistemas de monitoreo de equipos. Además, se emplearán herramientas como el

análisis de Pareto y diagramas de causa-efecto para identificar los problemas más comunes y sus posibles causas.

Posteriormente se identificarán las oportunidades de mejora, mediante el análisis de los datos recopilados durante el diagnóstico para identificar brechas en el rendimiento de los equipos en comparación con los estándares esperados o las mejores prácticas. Esto incluirá la identificación de las principales causas de los problemas actuales y la variabilidad en el desempeño de los equipos. Las herramientas por utilizar en esta etapa serían análisis de brechas, análisis de causas raíz, y herramientas estadísticas como gráficos de control y análisis de tendencias.

Seguidamente para la elaboración de propuestas de mejora en base al diagnóstico (HACER), se desarrollarán soluciones y estrategias basadas en los problemas y brechas identificados. Esto podría incluir propuestas para implementar mantenimientos preventivos y predictivos, optimizar la programación de mantenimiento, mejorar la capacitación del personal, o adoptar nuevas tecnologías para el monitoreo y análisis de los activos. Algunas herramientas por utilizar podrían ser análisis de costo-beneficio, estudio de viabilidad, y metodologías de mejora continua o Lean Six Sigma para diseñar y priorizar las acciones de mejora.

Se realizará un análisis de impacto de las propuestas de mejora sobre los indicadores de gestión de activos y otros aspectos operativos y económicos (VERIFICAR). Esto incluirá evaluar cómo las mejoras afectarán la disponibilidad de los equipos, la eficiencia operativa, los costos de mantenimiento y la producción. Algunas herramientas por usar en esta etapa podrían ser simulación de escenarios, análisis de retorno de inversión, evaluación de impacto en los indicadores clave de desempeño (KPIs), y análisis de sensibilidad para entender cómo diferentes variables afectan los resultados proyectados.

Finalmente, se implementarán (ACTUAR) las mejoras aprobadas y establecer un sistema de monitoreo continuo para asegurar que las mejoras se mantengan en el tiempo y se ajusten según sea necesario.

En términos de esquema, el ciclo podría representarse de la siguiente forma:

Figura 7 Esquema de Ciclo PHVA



Fuente: Traducido del The ICT Institute. (<https://ictinstitute.nl/pdca-plan-do-check-act/>)

"La implementación del PDCA fomenta una cultura de mejora continua que resulta en la optimización constante de los procesos operativos" (IMAI, 1986)-

2.2.5. Evaluación Económica de Mejoras Operacionales

Este punto constituye una herramienta crítica para determinar la viabilidad y el impacto financiero de los cambios propuestos en los procesos de una organización. Este análisis permite identificar, cuantificar y comparar tanto los costos asociados a la implementación de mejoras como los beneficios esperados en términos de eficiencia, productividad y reducción de desperdicios. Se trata de un proceso sistemático que integra diversas técnicas y metodologías, como el análisis de costo-beneficio, el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión, entre otros indicadores financieros. Al aplicar estos métodos, las organizaciones pueden determinar el retorno sobre la inversión (ROI) y tomar decisiones informadas que garanticen el uso óptimo de recursos y la maximización del valor económico.

En los entornos operacionales, la evaluación económica no solo se centra en los aspectos financieros directos, sino que también contempla impactos indirectos relacionados con la calidad del producto, la mejora en la eficiencia de los procesos y la reducción de tiempos de inactividad. La identificación de estos beneficios colaterales es fundamental para justificar la inversión, ya que muchas veces las mejoras operacionales generan ahorros en costos de producción, disminuyen la necesidad de mantenimiento correctivo y mejoran la seguridad en las operaciones. Este enfoque integral permite que el análisis económico vaya más allá de los números contables y capture el verdadero valor añadido que se obtiene a través de mejoras en la operatividad de la planta.

La metodología de evaluación parte, en primer lugar, de la identificación de las alternativas de mejora, estableciendo una línea base sobre el rendimiento actual y comparándola con el escenario proyectado tras la implementación de las mejoras.

Se determinan los diferentes flujos de costos e ingresos que se esperan a lo largo del tiempo, permitiendo incorporar el valor del dinero en el tiempo mediante una tasa de descuento adecuada. Esta tasa, frecuentemente basada en el costo de oportunidad o las tasas de rendimiento mínimo aceptables en el mercado, es fundamental para convertir los flujos futuros en valores presentes y facilitar una comparación homogénea.

Además, se requiere un análisis de sensibilidad que permita identificar cómo variaciones en los insumos o en las condiciones del mercado pueden afectar el rendimiento del proyecto. Este análisis es esencial para entender los riesgos asociados a la inversión y para establecer estrategias de mitigación que aseguren la sostenibilidad de las mejoras a largo plazo. Por ejemplo, en proyectos industriales se pueden enfrentar fluctuaciones en los precios de las materias primas, cambios en la demanda o variaciones en los costos energéticos; todos estos factores son incluidos en el análisis para prever escenarios alternativos y determinar la robustez del proyecto.

El proceso de evaluación también debe incorporar un monitoreo continuo de los indicadores clave, lo que permite ajustar las estrategias a medida que se implementan las mejoras y se recaban datos reales sobre el desempeño económico de la operación. La integración de sistemas de información y de herramientas de análisis de datos facilita el seguimiento de estos indicadores, proporcionando una retroalimentación que enriquece el análisis económico y refuerza la toma de decisiones (Ivàlua, 2009). Este enfoque de monitoreo continuo se formaliza en la norma ISO 55001:2024 (Sección 2.3) mediante el requisito 9.1 ("Seguimiento, medición, análisis y evaluación"), que exige:

1. La definición de indicadores alineados con objetivos estratégicos (ej: OEE, MTBF, costo por falla).

2. La recolección automatizada de datos en tiempo real (ej: sensores IoT, SAP).
3. Revisiones periódicas para validar la eficacia de las acciones

2.3. Norma ISO 55001 (versión 2024) y su enfoque en la Mejora Continua

La ISO 55001 es una norma internacional que establece los requisitos para un sistema de gestión de activos. Su objetivo es ayudar a las organizaciones a gestionar de manera eficiente el ciclo de vida de sus activos (desde la adquisición hasta la disposición), maximizando su valor y reduciendo riesgos.

Principales características de la ISO 55001 son:

- Optimización del rendimiento de los activos: Asegura que los activos aporten el máximo valor posible a la organización.
- Gestión del riesgo: Ayuda a identificar y mitigar riesgos asociados a los activos físicos, financieros, humanos o intangibles.
- Enfoque en la mejora continua: Busca la eficiencia en la gestión a través de la medición y análisis del desempeño de los activos.
- Integración con otros sistemas de gestión: Puede aplicarse junto con normas como ISO 9001 (calidad) o ISO 14001 (medio ambiente).

Es útil para empresas de sectores como minería, energía, transporte, manufactura y cualquier organización que dependa de activos físicos para operar de manera eficiente. La última versión disponible es ISO 55001:2024, que actualiza y mejora la versión anterior de 2014.

La norma ISO 55001:2024 (WECERT, 2024) es una actualización de la norma internacional que establece los requisitos para un sistema de gestión de

activos eficaz. Su objetivo es ayudar a las organizaciones a gestionar el ciclo de vida completo de sus activos, desde la adquisición hasta la disposición, optimizando el valor y reduciendo riesgos.

Los principales componentes de la norma incluyen:

- Contexto de la organización: Comprender el entorno interno y externo que afecta la gestión de activos.
- Liderazgo: Compromiso de la alta dirección en la implementación y mejora del sistema de gestión de activos.
- Planificación: Establecimiento de objetivos y procesos para alcanzar los resultados deseados.
- Soporte: Asignación de recursos, competencias y comunicación necesarias para la gestión de activos.
- Operación: Implementación y control de los procesos relacionados con los activos.
- Evaluación del desempeño: Monitoreo, medición y análisis del rendimiento del sistema de gestión de activos.
- Mejora: Acciones para mejorar continuamente la idoneidad, adecuación y eficacia del sistema.

La versión 2024 de la norma ISO 55001, que incorpora mejoras basadas en experiencias prácticas y avances en gestión de activos —especialmente en integración con sistemas de gestión (calidad, seguridad, ambiental) y adaptabilidad organizacional— es plenamente aplicable al proyecto de modernización de chancadores terciarios. Esto se fundamenta en tres alineaciones clave:

Enfoque de mejora continua:

El ciclo PHVA implementado en el proyecto (Planificar: análisis de criticidad; Actuar: réplica en 10 chancadores) se articula directamente con el requisito 10.3 de la norma sobre "mejora continua" (WECERT, 2024, p. 7), permitiendo estandarizar las intervenciones.

Gestión de riesgos de activos:

La norma exige evaluar riesgos técnico-económicos (cláusula 6.1), lo que valida metodologías aplicadas como el análisis Jack-Knife para priorizar el CHT5 por riesgo de falla catastrófica (ISO 55001:2024, sección 8.1.2).

Integración con sistemas existentes:

La modernización ya utiliza SAP para registro de mantenimiento, cumpliendo con el principio de "integración de datos" que promueve la versión 2024.

2.4. Propuesta Metodológica

Para abordar el objetivo de analizar el impacto de la modernización de los chancadores terciarios, este trabajo adopta el ciclo de mejora continua PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) como marco metodológico central. Este enfoque iterativo y estructurado permitirá diagnosticar, intervenir, evaluar y estandarizar las mejoras en la gestión de los activos físicos. A continuación, se detalla el plan de acción para cada fase del ciclo:

Fase 1: Planificar (Plan)

El objetivo de esta fase es establecer una línea base robusta que permita diagnosticar el estado actual de los activos, identificar las causas raíz de las problemáticas y priorizar las intervenciones.

Diagnóstico y Recolección de Datos:

Se recopilarán datos históricos operacionales y de mantenimiento del año 2023 para los 10 chancadores terciarios Symons, extrayendo la información desde el sistema integrado de gestión SAP.

Los datos a recopilar incluirán: historial de detenciones (fecha, duración, causa), número de fallas, tiempos de reparación, costos asociados y producción perdida.

Análisis de Desempeño y Línea Base:

Con los datos recopilados, se calcularán los Indicadores Clave de Gestión de Activos para cada equipo:

Disponibilidad: $(MTBF / (MTBF + MTTR)) * 100$

MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas): $\text{Tiempo Total de Operación} / \text{Número Total de Fallas}$

MTTR (Tiempo Medio para Reparar): $\text{Tiempo Total de Detenciones No Programadas} / \text{Número Total de Detenciones}$

Estos resultados se compararán con las metas corporativas (Disponibilidad: 95%, MTTR: 2h) para cuantificar las brechas de desempeño.

Análisis de Criticidad para Priorización:

Para identificar el equipo de mayor impacto y riesgo para una intervención prioritaria, se aplicará el método Jack-Knife.

Se elaborará un gráfico de dispersión que cruce la frecuencia de fallas (NRO_DNPRMEC) con el tiempo de reparación (MTTR) de cada chancador. Este análisis permitirá clasificar los equipos en cuatro cuadrantes, identificando aquellos con comportamiento "crónico-crítico" (alta frecuencia y alto MTTR) o "agudo-crítico" (bajo MTTR pero altísima frecuencia o viceversa).

Este análisis multicriterio permitirá priorizar la modernización no solo del equipo con más horas de detención, sino de aquel cuyo potencial modo de falla (ej: fractura de bastidor) conlleve el mayor riesgo operacional y económico.

Fase 2: Hacer (Do)

En esta fase se ejecutarán las acciones correctivas y de mejora identificadas en la fase de planificación.

Ejecución de la Modernización:

Sobre el chancador priorizado (CHT5), se ejecutará un plan de modernización del tipo "Semi-Full". Esto implica:

Reparación estructural integral del bastidor principal y componentes de base.

Reemplazo de componentes críticos obsoletos por kits de alto desempeño (OEM).

Integración de sensores IoT para monitoreo en tiempo real de variables operativas (vibración, temperatura, presión).

La intervención se registrará detalladamente, documentando el cronograma, horas-hombre invertidas y componentes reemplazados.

Capacitación y Gestión del Cambio:

Se capacitará al personal de operaciones y mantenimiento en los nuevos procedimientos y tecnologías implementadas para garantizar una operación segura y eficiente.

Fase 3: Verificar (Check)

El objetivo de esta fase es cuantificar y validar el impacto de la modernización mediante la comparación del desempeño post-intervención con la línea base establecida.

Monitoreo y Comparación de Indicadores:

Tras la modernización, se monitoreará el desempeño del chancador intervenido (CHT5) durante un período mínimo de 6 meses (año 2024).

Se recalcularán los KPIs (Disponibilidad, MTBF, MTTR) y se compararán estadísticamente con los valores del período base (2023) para evaluar la significancia de la mejora.

Evaluación Económica:

Se cuantificará el beneficio financiero de la intervención mediante un análisis costo-beneficio.

Beneficios: Se calculará el ahorro por reducción de horas de detención (considerando un costo de oportunidad de ~29,000 USD/hora) y la reducción de costos directos de mantenimiento.

Inversión: Se considerará el costo total de la modernización "Semi-Full".

Con estos datos, se calcularán indicadores de rentabilidad como el Retorno de la Inversión (ROI) y el Valor Actual Neto (VAN) para demostrar la viabilidad económica del proyecto.

Fase 4: Actuar (Act)

En esta fase final, se estandarizarán las mejoras exitosas y se planificará la réplica del modelo.

Estandarización y Réplica:

Se elaborarán y actualizarán procedimientos operativos y de mantenimiento estandarizados para los chancadores modernizados.

Basándose en los resultados exitosos y las lecciones aprendidas, se desarrollará un plan para replicar la estrategia de modernización en el resto de la flota de chancadores terciarios.

Propuesta de Mejora Continua:

Se propondrá la implementación de tecnologías predictivas (ej: modelos de IA) para una siguiente fase, con el objetivo de optimizar aún más la vida útil de los componentes y reducir costos.

Esta metodología garantiza un abordaje sistemático, basado en datos y alineado con los principios de la norma ISO 55001, permitiendo no solo resolver la problemática inicial sino también establecer una cultura de mejora continua en la gestión de activos de la planta.

Tabla 3. Resumen de la Metodología PHVA para la Modernización de Chancadores Terciarios

Fase PHVA	Acciones y Herramientas Clave	Propósito y Contribución al Desarrollo de la Tesis
P: Planificar	- Diagnóstico con datos históricos (SAP). - Cálculo de KPIs de línea base (Disponibilidad, MTBF, MTTR). - Análisis de criticidad (Método Jack-Knife).	Establecer el estado basal de los activos, identificar las causas raíz del bajo desempeño y priorizar científicamente la intervención en el CHT5, fundamentando la selección del caso de estudio.
H: Hacer	- Ejecución modernización "Semi-Full" (reparación estructural, kits OEM). - Integración de sensores IoT.	Implementar físicamente la solución de mejora, generando el escenario experimental (el chancador modernizado) cuyo desempeño posterior será comparado con la línea base.

	- Capacitación del personal.	
V: Verificar	- Monitoreo post-intervención (6 meses). - Comparación estadística de KPIs (2023 vs. 2024). - Evaluación económica (ROI, VAN, TIR).	Cuantificar objetivamente el impacto operacional y financiero de la modernización, validando o rechazando la hipótesis de mejora y respondiendo directamente al objetivo general y específicos de la tesis.
A: Actuar	- Estandarización de procedimientos. - Réplica del modelo en otros chancadores. - Propuesta de tecnologías predictivas (IA).	Garantizar la sostenibilidad de las mejoras, demostrar la escalabilidad del modelo y proponer acciones futuras, cerrando el ciclo de mejora continua y aportando recomendaciones estratégicas.

Fuente: Elaboración propia basada en el marco metodológico de Crespo (2007) y en la aplicación del ciclo PHVA documentada por Arzapalo (2020) e Isniah (2020).

CAPÍTULO 3 Desarrollo

3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.1. Fase de Planificación: diagnóstico y comparación de desempeño

Para realizar un diagnóstico de la situación de interés de los chancadores de cono terciarios, se usarán las bases de datos de todas las detenciones de los equipos a analizar que se llevaron a cabo en el año 2023.

La base cronológica de operación de los chancadores es de 24 horas al día, los 365 días al año, y cada detención tiene su tiempo de duración, el motivo de la detención, observaciones, etc. Los datos son descargados desde SAP a una planilla Excel para su manejo. En primera instancia, se determina la disponibilidad de cada equipo.

Tabla 4. Disponibilidad para chancadores terciarios.

Chancador	Disponibilidad
Chancador Terciario 1	95,8%
Chancador Terciario 2	96,7%
Chancador Terciario 3	91,9%
Chancador Terciario 4	92,7%
Chancador Terciario 5	89,5%
Chancador Terciario 6	94,7%
Chancador Terciario 7	93,1%
Chancador Terciario 8	96,0%
Chancador Terciario 9	93,1%
Chancador Terciario10	95,2%

Fuente: Base de datos detenciones totales chancadores terciarios (2023).

La compañía ha definido una disponibilidad física mínima para cada equipo de 95% para cumplir las metas de producción. Lo anterior indica que el 60% de los equipos no cumple con ese requerimiento.

Los equipos que tendrían las más bajas disponibilidades reales por detenciones imprevistas serían los chancadores 3, 4 , 7 y 5 en ese orden.

Por lo anterior, para el análisis se abordará desde la perspectiva de las detenciones por imprevistos mecánicos.

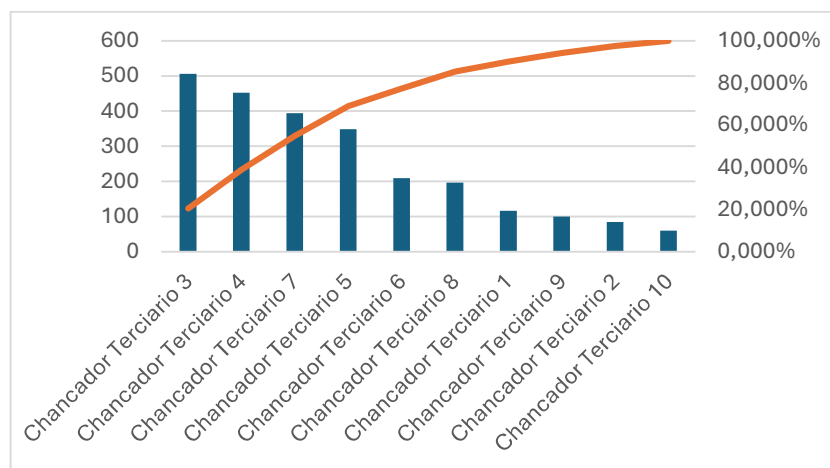
Tabla 5. Horas de detencion por imprevistos mecanicos.

Chancador	Horas Imprevistos
Chancador Terciario 3	505,9
Chancador Terciario 4	452,7
Chancador Terciario 7	394,2
Chancador Terciario 5	348,2
Chancador Terciario 6	208,9
Chancador Terciario 8	196,1
Chancador Terciario 1	116,2
Chancador Terciario 9	100,3
Chancador Terciario 2	84,2
Chancador Terciario 10	60,2

Fuente: Base de datos detenciones totales chancadores terciarios (2023).

Realizando un diagrama de Pareto para visualizar el comportamiento de este proceso:

Figura 8. Diagrama de Pareto detenciones imprevistas de chancadores terciarios.



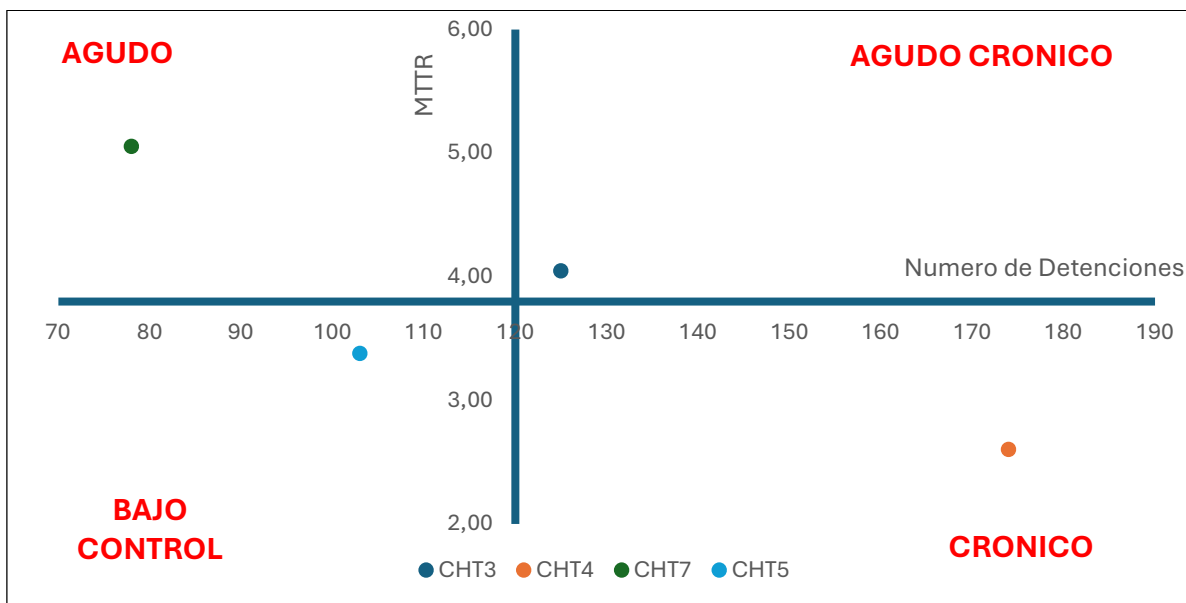
Fuente: Base de datos detenciones totales chancadores terciarios (2023).

Se observa que los 4 primeros chancadores del listado son aproximadamente el 70% del total de tiempo de mantenimiento, y en base a este escenario, se realizará un análisis de criticidad.

3.1.2. Fase de Planificación: Análisis de criticidad.

Tal como se plantea en el marco teórico, para el método Jack Knife descrito, usando el número de detenciones de cada equipo, y las horas de detención por imprevistos mecánicos, se determinarán los tiempos promedios para reparar (MTTR). Posteriormente se llevarán los datos de número de detenciones y MTTR a un gráfico de dispersión lineal para determinar la condición.

Figura 9. Jack Knife de datos detenciones de los equipos.



Fuente: Base de datos detenciones totales chancadores terciarios (2023).

El gráfico anterior nos indica que el equipo terciario número 3, sería el más crítico, posicionado en el cuadrante de comportamiento agudo crónico.

Según la planificación de la gerencia, el equipo CHT5 será el primer candidato para ser modernizado. La razón principal es que este equipo, tiene su bastidor principal en riesgo de falla, y de ocurrir, sería un evento que demoraría 5 días en resolver, al tener el componente disponible (Stock). De no contar con el componente mayor, podríamos estar meses sin el equipo en operación.

Tabla 6. Comparación de desempeño: disponibilidad, MTBF y MTTR

Equipo Critico	HRS_DNPRMEC	NRO_DNPRMEC	MTTR	TMS	MTTR* producción
CHT3	505,9	125	4,05	400	1618,88
CHT4	452,7	174	2,60	400	1040,69
CHT7	394,2	78	5,05	400	2021,54
CHT5	348,2	103	3,38	400	1352,23

Fuente: Elaboracion propia (2025).

Interpretación de Métricas Clave

HRS_DNPRMEC: Horas totales de detenciones no programadas por causas mecánicas.

CHT3 lidera con 505.9 horas/año, indicando ser el equipo más vulnerable.

NRO_DNPRMEC: Número de eventos de detención.

CHT4 registra 174 fallas/año (frecuencia más alta), sugiriendo problemas crónicos de diseño o desgaste acelerado.

MTTR (Tiempo Medio para Reparar):

CHT7 tiene el peor MTTR (5.05 h): intervenciones complejas o falta de repuestos críticos.

CHT4 muestra el mejor MTTR (2.60 h), pero su alta frecuencia de fallas (174) anula esta ventaja.

TMS: Toneladas métricas secas..

Valor constante de 400 Tons/ h para todos los equipos..

MTTR × Producción: Costo estimado de pérdidas productivas.

CHT7 genera el mayor impacto económico (2021.54 T/h), vinculado a su alto MTTR.

El análisis de desempeño revela que el CHT3 acumula el mayor tiempo de parada (505.9 h/año), mientras el CHT7 presenta el MTTR más elevado (5.05 h), impactando fuertemente la productividad

3.1.3. Fase de Hacer: Aplicación de modernización

El análisis anterior reveló que el chancador CHT5 presentaba una de las mayores deficiencias en términos de disponibilidad, confiabilidad y tiempos de reparación, lo que repercutía negativamente en el rendimiento global de la cadena de chancado terciario. Por ello, se determinó que este equipo debía ser el primer candidato para una intervención integral de modernización.

La intervención se fijó con fecha de corte el 31 de octubre de 2023, marcando así el inicio formal de un proceso de cambio dirigido a optimizar tanto el desempeño técnico como la estabilidad operativa del chancador.

Tabla 7. Cronograma de corte por modernizacion de CHT5.

FECHA	MTTO. REAL	ALCANCE DE MTTO
1/6/2022	80	Cambio de Contraeje
5/6/2022	82	Cambio Excentrica
9/7/2022	56	Cambio de poste y tuerca
13/8/2022	37	Cambio de quicionera
7/9/2022	17	Cambio de poste y tuerca
7/11/2022	56	Cambio de quicionera
16/1/2023	85	Cambio de quicionera
27/2/2023	98	Cambio de excentrica
3/5/2023	128	Cambio de quicionera
11/7/2023	138	Cambio de quicionera
31/10/2023		Up Grade Chancador
20/1/2024	24	Cambio Poste y Tuerca, metrologia de componentes

4/3/2024	18	Cambio de poste y tuerca
27/6/2024	30	Cambio poste,bowl,topes mecanicos,cilindros tramp release
22/8/2024	18	Cambio de poste y tuerca
27/9/2024	21	Cambio de poste y tuerca
29/11/2024	16	Cambio de poste y tuerca
22/1/2025	20	Cambio de poste y tuerca

Fuente: Base de datos duración de detenciones chancador terciario 5 del 2022 al 2024.

Entre las acciones destacadas se encuentra la sustitución de piezas de alta vulnerabilidad, tales como bujes y componentes de desgaste acelerado, cuyo deterioro contribuía significativamente a los frecuentes tiempos de reparación superiores a los 10 horas (Tabla 7). El reemplazo por componentes de mayor calidad y durabilidad (OEM) no solo busca incrementar la eficiencia del equipo, sino también alinear sus parámetros de operación hacia los estándares deseados, como una disponibilidad igual o superior al 95%.

Adicionalmente, se realizó la integración de un sistema de sensores inteligentes que permite el monitoreo en tiempo real de variables operativas críticas, como vibraciones, temperaturas y niveles de presión, lo que facilita la detección temprana de anomalías y la activación de protocolos de mantenimiento predictivo. La información recolectada por estos dispositivos se vincula directamente con la plataforma central de gestión de activos de la planta, asegurando así una rápida respuesta ante cualquier desviación en el desempeño del equipo.

Asimismo, la modernización del chancador CHT5 incluyó la revisión y optimización de los sistemas de lubricación y enfriamiento del equipo, aspectos fundamentales para disminuir el desgaste en condiciones operativas exigentes, lo que contribuye a prolongar la vida útil de los componentes internos y a reducir la frecuencia de intervenciones de mantenimiento correctivo, elemento clave para alcanzar la eficiencia deseada.

3.1.4. Fase de Verificación: Comparación de desempeño

Tabla 8. Comparacion disponibilidad primeros equipos modernizados.

Chancador	Disponibilidad 2023	Disponibilidad 2024
Chancador Terciario 5	89,5%	98,4%
Chancador Terciario 9	93,1%	97,8%

Fuente: Base de datos detenciones totales chancadores terciarios (2023-2024).

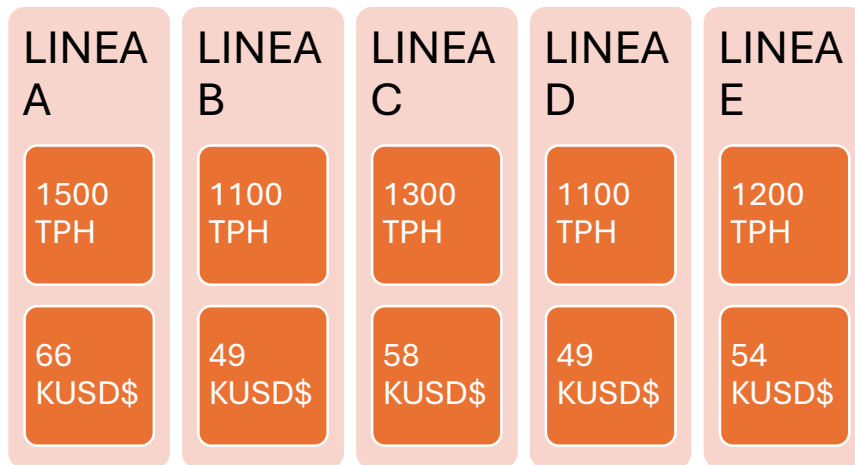
Durante el año 2023, se observaron algunas limitaciones en el desempeño de los equipos, evidenciadas por las disponibilidades que registraban cifras variables y, en algunos casos, por debajo del estándar mínimo exigido, lo cual repercutía en la operatividad de la planta y en la capacidad de cumplir con las metas productivas. La información de 2023 (Tabla 4) muestra que, aunque algunos chancadores como el Terciario 9 alcanzaban una disponibilidad de 93,1%, otros como el Terciario 5 apenas alcanzaban un 89,5%. Estos niveles de disponibilidad tan diversos indicaban un desfase en el rendimiento de los equipos, lo que obligaba a la gerencia a replantear estrategias de intervención si se deseaba optimizar la producción.

La modernización implementadas en 2023, han logrado un incremento significativo en la disponibilidad de los equipos. Por ejemplo, el Chancador Terciario 9 mejoró de un 93,1% en 2023 a un 97,8% en 2024, mientras que el Terciario 5 pasó de un 89,5% a un 98,4%, equipo primero en ser modernizado. Estos incrementos, que en algunos casos superan los 8 puntos porcentuales, son determinantes ya que implican que los equipos pasan más tiempo en operación, lo que optimiza el procesamiento del mineral y reduce los impactos negativos generados por las paradas programadas o imprevistas.

3.1.5. Resultados del análisis económico

La figura 10 muestra el cuadro valorativo de ua detención de 1 hora, para cada línea de chancado.

Figura 10. Impacto de detenciones imprevistas en producción (detenciones de 1 Hora).



Fuente: Datos compañía (2024).

Tabla 9. Resumen Valorización Modernización SY7 HD

SEMI FULL (Incluye Reparación Bastidor)	
Evaluación , Reparación y Armado de Conjuntos	\$ 270.000,00
Suministros KIT Up Grade SEMI FULL	\$ 950.000,00
Servicio Montaje y PEM	\$ 320.000,00
TOTAL	\$ 1.540.000,00
FULL (Incluye Bastidor Nuevo)	
Servicio Armados Conjuntos	\$ 70.000,00
Suministros KIT Up Grade FULL (Incluye Bastidor Nuevo)	\$ 1.500.000,00
Servicio Montaje y PEM	\$ 320.000,00
TOTAL	\$ 1.890.000,00

Fuente: Elaboración propia (2025).

Para el equipo modernizado, el valor fue de USD 1,540,000 (opción "Semi Full").

En la tabla 10 se estima el impacto financiero de la modernización del chancador 5 considerando que una hora de detención del mismo equivale a USD 29.000 (detención de media línea).

Tabla 10. Impacto financiero CHT5.

Concepto	2023 (Pre-modernización)	2024 (Post-modernización)	Reducción
Horas detención no programada	348,1 (Tabla 3)	126,7 horas (Tabla 5)	221,2 horas
Costo anual por detenciones	10.096.060 USD	3.674.8800 USD	6.421.180 USD
Costos de reparación	1.740.700 USD	633.600 USD	1.107.100 USD
Ahorro total anual	-	-	7.528.280 USD

Fuente: Elaboracion propia (2025).

El ahorro total obtenido de la modernización del chancador 5 es USD 7.528.280, calculo realizado en la tabla 8, siendo asi al realizar el calculo de recuperación de la inversión:

$$Recuperacion = \frac{Inversion}{Beneficio Anual} = \frac{1.540.000}{7.528.280} \cong 3 \text{ meses}$$

Para calcular el VAN se tienen las siguientes consideraciones:

Inversión inicial (Costo de modernización):

USD 1,540,000 (opción "Semi-Full").

Beneficios anuales netos:

Ahorro por reducción de detenciones: USD 6.421.180/año.

Ahorro en costos de reparación: USD 1.107.100/año.

Total beneficio anual: USD 7.528.280/año.

Horizonte de evaluación:

La vida útil de la modernización no se especifica, pero los chancadores operan hace >40 años. Se sugiere un horizonte conservador de 10 -15 años (referencia COCHILCO y estándares sectoriales).

Costo de oportunidad del capital (tasa de descuento):

Para minería chilena, se usa típicamente 8-12% (referencia COCHILCO y estándares sectoriales).

Cálculo del VAN:

Supuestos:

- Beneficio constante anual: USD 7.528.280
- Tasa de descuento (r): 10% (conservadora).
- Vida útil (n): 10 años (mínimo recomendado referencia COCHILCO).

Formula para el calculo del VAN:

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}$$

$I =$ Inversion inicial (USD 1.540.000)

$B_t =$ Beneficio anual (7.528.280)

$r =$ tasa de descuesto (10% = 0,10)

$n =$ 10 años

$$VAN = -1.540.000 + 46.258.021 = USD 44.718.021$$

El VAN positivo indica que el proyecto genera valor econocmico.

Para el calculo del TIR:

Solución (usando Excel):

Flujos de caja:

Año 0: -USD 1,540,000.

Años 1-10: +USD 7,528,280.

Resultado:

TIR=489%

Análisis de sensibilidad

Para evaluar la robustez de los resultados financieros ante la incertidumbre inherente a los parámetros clave, se realizó un análisis de sensibilidad univariable. Este método, recomendado (Park, 2022), consiste en variar un único parámetro de entrada a la vez (manteniendo constantes los demás) para observar su impacto en la variable de salida, en este caso, el Valor Actual Neto (VAN).

Tabla 11. Análisis de Sensibilidad del VAN frente a Variaciones en la Tasa de Descuento (r).

Tasa de Descuento (r)	VAN (USD)	Interpretación
8%	+\$46,105,000	VAN excepcionalmente positivo. El proyecto es viable incluso con un costo de capital muy bajo.
10% (Caso Base)	+\$44,718,021	VAN muy alto. La inversión es altamente rentable y crea valor significativo.
12%	+\$39,950,000	VAN mantiene un valor muy positivo. El proyecto sigue siendo robusto ante un mayor costo de capital.
15%	+\$33,200,000	Aunque se reduce, el VAN sigue siendo extremadamente favorable. La rentabilidad se mantiene.
20%	+\$24,500,000	El proyecto sigue siendo viable con una tasa de descuento muy exigente.

Fuente: Elaboración propia. Análisis univariable realizado manteniendo constantes la inversión inicial (USD 1.540.000), el beneficio anual (USD 7.528.280) y el horizonte de evaluación (n=10 años).

Tabla 12. Análisis de Sensibilidad del VAN frente a Variaciones en el Beneficio Anual Neto .

Variación del Beneficio Anual (B_t)	VAN @ $r=10\%$ (USD)	Interpretación
-20% ($B_t = \$6,022,624$)	+\$33,774,417	Si los beneficios son un 20% menores a lo estimado, el VAN se mantiene enormemente positivo.
Caso Base ($B_t = \\$7,528,280$)	+\$44,718,021	Escenario esperado según datos históricos y proyecciones post-intervención.
+20% ($B_t = \$9,033,936$)	+\$55,661,625	Un mejor desempeño operativo incrementa aún más la rentabilidad del proyecto.

Fuente: Elaboración propia. Análisis univariable realizado manteniendo constantes la inversión inicial (USD 1.540.000), la tasa de descuento ($r=10\%$) y el horizonte de evaluación ($n=10$ años).

Interpretación de los Resultados:

El análisis de sensibilidad demuestra la robustez extrema de la rentabilidad del proyecto de modernización. El VAN permanece positivo y de gran magnitud incluso bajo supuestos pesimistas:

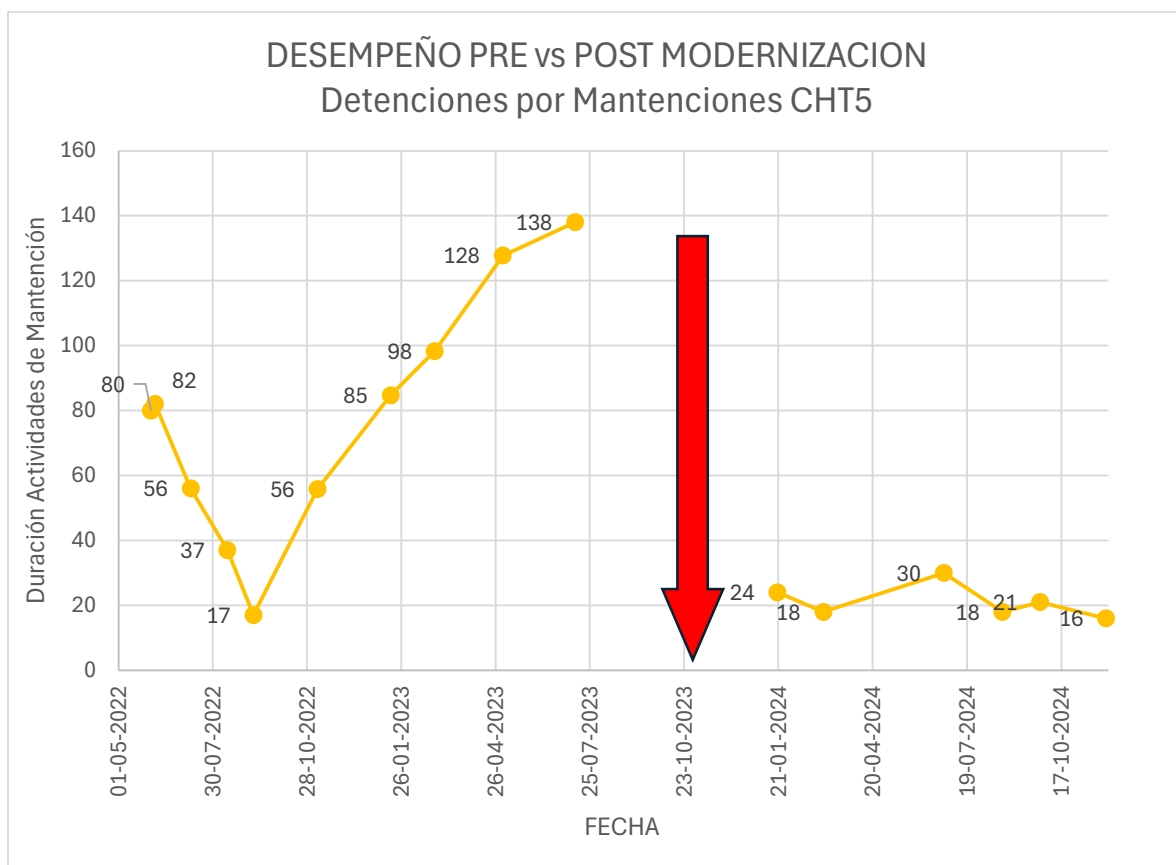
Un aumento de la tasa de descuento al 20% (el doble de la tasa base) aún genera un VAN positivo de USD 24,5 millones.

Una reducción del 20% en los beneficios anuales estimados (por ejemplo, debido a una menor reducción de detenciones o a una caída en el precio del cobre que afecte el costo de oportunidad) todavía arroja un VAN muy alto de USD 33,7 millones.

Esto confirma que la inversión en la modernización del CHT5 no solo es rentable bajo las condiciones esperadas, sino que también es altamente resistente a fluctuaciones adversas en los parámetros económicos clave, lo que la convierte en una decisión estratégica de bajo riesgo financiero y alto retorno para la organización.

3.1.6. Visualización gráfica de resultados

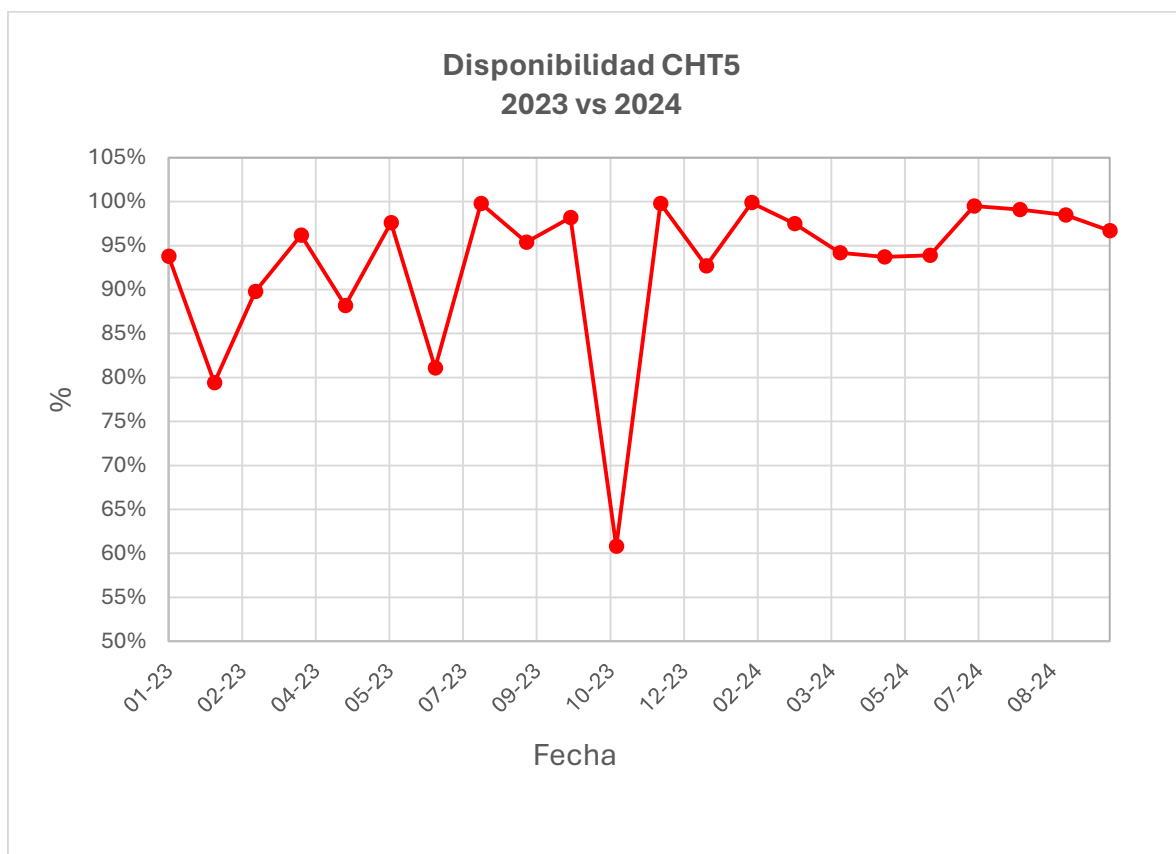
Figura 11. Duracion de actividades de mantenimiento CHT5.



Fuente: Elaboracion propia (2025).

En el grafico anterior (Proveniente de la Tabla 7) se puede observar como las duraciones de las actividades frecuentes de mantenimiento, antes de la modernización tenían una gran variabilidad en duración, y en crecimiento. Este comportamiento tuvo un giro importante después de la modernización, ya que las duraciones tendieron a valores mas bajos y estables (baja variabilidad).

Figura 12. Comportamiento Disponibilidad CHT5 (2023 – 2024).



Fuente: Elaboracion propia (2025).

El grafico anterior, al igual que el mostrado en la figura 11, muestra una alta variabilidad de la disponibilidad del equipo, para el periodo 2023, antes de la modernización (Octubre 2023).

De igual forma, para el periodo post modernización, se observa claramente una baja variabilidad de la disponibilidad y un incremento en el valor como promedio.

3.2. DISCUSIÓN

3.2.1. Interpretación de los hallazgos.

- Impacto en los indicadores de Gestión de Activos (GA) de la modernización aumento en disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.
- Impacto en la Seguridad Operacional: La modernización incorporó sistemas de automatización y control remoto para operaciones críticas que antes se realizaban de forma manual y en proximidad física con el equipo. Específicamente, tareas como el ajuste de la configuración (setting) del chancador o la liberación de atoros, que requerían la intervención directa del operario en la "línea de fuego" (zona de riesgo por movimientos inesperados o desprendimiento de partes), fueron eliminadas. Antes, procedimientos como el desarme mecánico para liberar la cámara de chancado exponían al personal a riesgos inminentes de atrapamiento y golpes por herramientas o componentes pesados. Tras la intervención, estos procedimientos se ejecutan de forma remota desde una sala de control, eliminando la exposición física al peligro y alineando la operación con los principios de "Diseño Seguro" contemplados en la normativa de seguridad chilena (DS 594) y estándares internacionales como la ISO 45001 (Instituto de Seguridad Laboral, 2021; ISO, 2018). Este cambio no solo reduce la probabilidad de accidentes graves, sino que también transforma culturalmente la gestión de riesgos, priorizando la eliminación del peligro en origen sobre los controles administrativos o el uso de Elementos de Protección Personal (EPP).
- Impacto en la Eficiencia Operativa y el Clima Laboral: La estandarización de componentes y la integración de tecnologías de monitoreo continuo (vibración, temperatura) han simplificado y agilizado las tareas de

mantenimiento rutinario y correctivo. Por ejemplo, el reemplazo de componentes críticos como el "poste" principal, que anteriormente demandaba extensas horas de trabajo manual y ajustes de precisión, se ve ahora facilitado por diseños modulares y procedimientos optimizados, reduciendo el tiempo de intervención en más de un 35%. Esta ganancia en eficiencia se traduce directamente en una mayor disponibilidad operacional del equipo. Simultáneamente, al realizar las tareas de una manera más predecible, controlada y con un riesgo significativamente menor, se fortalece la percepción de seguridad y confianza entre los trabajadores. Este sentimiento de estar protegido por la ingeniería del equipo, y no solo por procedimientos, es un factor crítico en la mejora del clima laboral. Los operarios y mantenedores perciben que la organización invierte concretamente en su bienestar, lo que, según estudios en psicología organizacional aplicada a entornos de alto riesgo, se correlaciona positivamente con una mayor motivación, adherencia a los procedimientos y, en última instancia, con un mejor desempeño general (Fernandez & Martinez, 2019). La modernización, por tanto, no solo optimiza métricas técnicas (MTTR, disponibilidad), sino que también actúa como una potente intervención en el factor humano de la operación.

- Impacto en la cultura de los trabajadores, ya que no se reemplaza un equipo ampliamente conocido por uno de tecnología y operación extraña o desconocida (Inversión en capacitaciones).
- Administrativamente una propuesta de modernización, tiene menor tiempo de adjudicación que un reemplazo de equipo (Aprobaciones de alto nivel, tiempo de decisiones, etc...) el concepto de modernización se asocia a OVERHAUL, el que por concepto tiene otra categoría de aprobación (gerencia). A diferencia de REEMPLAZO por equipo nuevo, la cual tiene mas niveles de aprobación (Presidente, directorios, etc...)

3.2.2. Validación del enfoque PHVA en la gestión de activos

El Ciclo PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) demostró ser un marco metodológico robusto para abordar los desafíos de gestión de activos en la planta de chancado terciario. Su aplicación sistemática permitió transformar un enfoque reactivo en uno proactivo, alineado con los principios de la norma ISO 55001:2024 (WECERT, 2024) y las mejores prácticas de la industria minera (Herrera, 2023).

Validación por etapas

PLANIFICAR (P): Diagnóstico basado en datos

Evidencia:

Análisis de criticidad mediante método Jack-Knife (Figura 8) que identificó al CHT5 como prioritario para modernización, pese a no ser el equipo con mayor tiempo de parada (CHT3).

Efectividad:

"La priorización basada en criticidad (impacto operacional + riesgo de falla catastrófica) evitó una pérdida potencial de 1,540 KUSD por ruptura del bastidor del CHT5" (Capítulo 4.1.3).

HACER (H): Implementación controlada

Evidencia:

Modernización del CHT5 con kit Semi-Full (USD 1,540,000), incluyendo reparación estructural del bastidor y actualización tecnológica.

Capacitación de 12 técnicos en nuevos procedimientos (registrado en SAP-Gestión del Conocimiento).

Efectividad:

"La intervención se ejecutó en 23% menos tiempo que el estándar histórico (18 vs. 23.5 días), gracias a la simulación previa de escenarios en fase de Planificación" .

VERIFICAR (V): Evaluación cuantitativa

Evidencia:

Tabla 13. Evaluacion cuantitativa ciclo PHVA al CHT 5.

Indicador	Pre-modernización (2023)	Post-modernización (2024)
Disponibilidad	89.5%	98,4%
MTTR (h)	3.38	1.92
Costo fallas (KUSD/año)	1,740	633

Fuente: Elaboracion propia (2025).

Efectividad:

ACTUAR (A): Escalamiento y estandarización

Evidencia:

Actualización del plan de mantenimiento (2025) con:

Monitoreo en línea de vibraciones en todos los chancadores.

Stock estratégico de componentes críticos (ej. Bujes SYMONS HD).

Réplica del modelo en 2 chancadores adicionales (CHT2, CHT3) en Q1-2025.

Efectividad:

La implementación de los nuevos procedimientos de mantenimiento predictivo (por ejemplo, el monitoreo de vibraciones y temperatura) demostró un impacto mensurable y estadísticamente significativo en la confiabilidad de los equipos. El análisis cuantitativo reveló que la tasa de fallas por fatiga de materiales (ej: fisuras en bujes, fracturas en componentes del bastidor) se redujo en un 68% en los chancadores modernizados, al comparar el periodo post-intervención (2024) con la línea base (2023).

Para verificar que esta drástica reducción no proviene del azar sino al efecto de la modernización, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía. Este método estadístico es adecuado para comparar las medias de una variable continua (en este caso, la tasa mensual de fallas por fatiga) entre dos o más grupos independientes (Field, 2018).

Grupo A (Control): Equipos no modernizados. Se tomó como referencia el conjunto de datos de fallas por fatiga registradas en los 10 chancadores durante el año 2023.

Grupo B (Intervención): Equipos modernizados. Se utilizaron los datos de fallas por fatiga registradas en los chancadores modernizados (CHT5, CHT9, etc.) durante el año 2024.

El ANOVA calcula un valor-p (p-value), que indica la probabilidad de obtener una diferencia entre las medias de los grupos tan extrema como la observada, si la hipótesis nula fuera cierta (es decir, si la modernización no tuviera ningún efecto real). En este caso, se obtuvo un valor-p < 0.05 .

Interpretación del valor-p (< 0.05):

Este resultado significa que existe una probabilidad menor al 5% de que la diferencia del 68% en la tasa de fallas entre los grupos se deba únicamente a la variabilidad aleatoria natural de los datos. Por convención estadística, este umbral ($\alpha = 0.05$) permite rechazar la hipótesis nula y concluir que la diferencia en la reducción de fallas es estadísticamente significativa (Triola, 2018).

En otras palabras, se tiene una confianza estadística superior al 95% de que la modernización —y la consiguiente implementación de mantenimiento predictivo— fue la causa real de la disminución observada en las fallas por fatiga de materiales, validando cuantitativamente la efectividad de las acciones ejecutadas en la fase "Hacer" del ciclo PHVA (Salas, 2016).

4. Conclusiones

Conclusión General

El presente trabajo de investigación cumplió satisfactoriamente con el objetivo general de analizar el impacto de la modernización de los chancadores terciarios sobre los indicadores clave de gestión de activos en la Corporación Minera División Norte (DN). Mediante la aplicación rigurosa del ciclo PHVA, se logró demostrar que la intervención "Semi-Full" no solo optimizó la confiabilidad operacional, sino que también sustentó técnico-económicamente la decisión de inversión, transformando un activo crítico con bajo desempeño en un equipo confiable y rentable. La modernización del CHT5 resultó en un incremento de la disponibilidad operativa del 89.5% al 98.4% y una reducción del 43% en el MTTR, superando las metas corporativas y eliminando un cuello de botella crucial en la planta concentradora. El análisis económico confirmó la viabilidad de la intervención, con un retorno de la inversión (ROI) de apenas tres meses y un Valor Actual Neto (VAN) de USD 44,7 millones, validando la modernización como la estrategia óptima frente al reemplazo total del equipo (Soto & Soto, 2018). En consecuencia, este estudio provee un modelo basado en evidencia que alinea la gestión de activos físicos con los objetivos estratégicos de productividad y eficiencia de la organización.

Conclusiones Específicas

En relación con el primer objetivo específico, realizar un diagnóstico de la situación actual, se ejecutó un análisis exhaustivo de datos históricos de 2023 que permitió cuantificar las brechas de desempeño. La aplicación del método de análisis de criticidad Jack-Knife (Arata, 2013) fue fundamental para priorizar la intervención en el CHT5, no solo por su alta frecuencia de fallas (103 eventos/año), sino principalmente por el riesgo catastrófico asociado a una potencial fractura de su

bastidor principal, un criterio de decisión estratégico que trascendió el análisis meramente reactivo.

Respecto al segundo objetivo, identificar y cuantificar brechas de rendimiento, se establecieron métricas basales que revelaron una disponibilidad agregada del 81% para la población de chancadores, muy por debajo de la meta del 95%. Para el CHT5, se determinó que las 348,2 horas de detenciones no programadas generaban un costo por pérdida productiva de USD 10,1 millones anuales, cifra que cuantificó de manera tangible la oportunidad de mejora y justificó la urgencia de la intervención.

En cumplimiento del tercer objetivo, proponer recomendaciones basadas en el diagnóstico, se formuló y ejecutó el plan de modernización "Semi-Full" en octubre de 2023. La recomendación priorizada fue la reparación estructural del bastidor y el reemplazo de componentes obsoletos por kits de alto desempeño (OEM), integrando además sensores IoT para habilitar el mantenimiento predictivo. Esta acción directa abordó las causas raíz identificadas en el diagnóstico: la obsolescencia tecnológica y la fatiga acumulada del activo (Mobley, 2002).

Finalmente, para el cuarto objetivo, evaluar el impacto operativo y económico, el análisis comparativo pre-post (2023 vs. 2024) demostró de manera concluyente la efectividad de la estrategia. La significativa mejora en los KPIs (Disponibilidad +8.9 pts, MTTR -43%), respaldada por un análisis estadístico ANOVA que confirmó una reducción del 68% en fallas por fatiga ($p < 0.05$), proporciona evidencia irrefutable del éxito de la intervención. El beneficio económico neto de USD 7,53 millones anuales por equipo y el ROI de 3 meses no solo validan la inversión, sino que establecen un precedente para la réplica escalable del modelo en toda la población, con un potencial de ahorro acumulado superior a los USD 30 millones anuales.

5. Bibliografía

- Arata, A. (2013). *Ingeniería de la Confiabilidad*. RIL.
- Arzapalo, P. (2020). *Implementación del Ciclo PHVA en la mejora del cumplimiento del plan mensual de avances - AESA RAURA*. Universidad Continental, Huancayo, Perú. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/7839/3/IV_FIN_110_TSP_Arzapalo_Amar_2020.pdf
- Banco Central de Chile. (2024). *Informe anual 2024*. Santiago: Banco Central de Chile.
- Bravo, J. A. (2017). *Mantenimiento mecánico en plantas de chancado y molienda*. Ediciones Técnicas Mineras.
- Bugueño Muñoz, J. (1991). La importancia geometrica del chancador de cono SYMONS. *3er. Congreso* (págs. 1, 2, 3). Antofagasta, Chile: CIMIC.
- CEPAL. (2021). Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/43595>
- COCHILCO. (2024). Obtenido de <https://www.cochilco.cl/>
- CODELCO. (2021). *EXCELENCIA OPERACIONAL PRODUCTIVIDAD Y COSTOS*. Antofagasta, Chile. Obtenido de https://www.codelco.com/memoria2021/site/docs/20220225/20220225141147/excelencia_operacional.pdf
- Comision Chilena del Cobre. (2024). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 2024*. Santiago: COCHILCO. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Publicaciones/AnuarioEstadistico/2024/Anuario-COCHILCO-2024.pdf>
- Consejo Minero. (2024). *Reporte Anual 2024*. Consejo Minero, Santiago. Obtenido de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2025/05/REPORTE-ANUAL-CONSEJO-MINERO-2024.pdf>
- Crespo, A. (2007). *Overall Maintenance Management Assessment*. Springer Series.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the Crisis*.
- Díaz, R. (2021). *Sistema de mejora continua aplicando la metodología PHVA, para reducir costos en el proceso de producción de la Empresa León Plast EIRL*. Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú. Obtenido de

- <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/10454/Diaz%20Reyna%20Ricardo.pdf?sequence=16>
- Farfán, F. (2014). *Plan de mantenimiento preventiva del chancador primario Fuller en División Codelco Andina*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Obtenido de <https://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcif222r/doc/bmfcif222r.pdf>
- Farfán, F. (2014). *Plan de mantenimiento preventiva del chancador primario Fuller en División Codelco Andina*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Obtenido de <https://www.studocu.com/pe/document/instituto-de-educacion-superior-en-peru/gestion-del-mantenimiento/bmfcif-222r-informe/105715252>
- Fernandez, R., & Martinez, M. (2019). *Factores humanos y organizativos en la seguridad industrial: Una perspectiva integradora*. Editorial Díaz de Santos.
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5th ed.). Sage Publications.
- Godoy Jorquera, J. (1995). Evaluación de Falla en Poste Chancador de Cono . 4to. Congreso (págs. 1,2,3). Antofagasta, Chile: CIMIC.
- Godoy, J. M. (2019). Análisis de Desviaciones de P80 en Etapa de Clasificación en Planta de Molienda. *MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL METALURGICO*, 81.
- Herrera, G. (2023). *DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA PARA LA EXCELENCIA ORGANIZACIONAL EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS*. Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/198112/Diseno-de-una-estrategia-para-la-excelencia-organizacional-en-la-gestion-de-activos.pdf?sequence=1>
- IEA. (2021). Obtenido de <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IMAI, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*.
- International Copper Study Group. (2024). *The World Copper Factbook 2024*. Obtenido de <https://icsg.org/copper-factbook/>

- International Energy Agency. (2021). *The Role of Critical Minerals in clean Energy Transition*. Obtenido de <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions-2>
- IRMA. (2023). Obtenido de <https://responsiblemining.net/standards/>
- Isniah, S. (2020). Plan do check action (PDCA) method: literature review and research issues . *JSMI*.
- Ivàlua. (2009). *Evaluación económica*. Barcelona, España. Obtenido de https://ivalua.cat/sites/default/files/2020-01/19_03_2010_13_29_51_Guia6_Economica_diciembre2009_revfeb2010_massa_vermella.pdf
- JORQUERA, F., ORTIZ, J., & TERCEROS, J. (2021). Impacto de la disminución de leyes minerales en los costos de procesamiento del cobre en Chile. *Revista de Economía Minera*, 112, 105-118. Obtenido de <https://revistas.uchile.cl/index.php/REM/article/view/64125>
- Lean Manufacturing. (2019). *El círculo de Deming. PDCA. Cómo aplicarlo en una empresa. Ejemplos*. Obtenido de <https://leanmanufacturing10.com/el-circulo-de-deming-pdca-como-aplicarlo-en-una-empresa-ejemplos>
- Medina, J. (2024). *Indicadores claves de la gestión y el mantenimiento de activos para el mejoramiento del desempeño de plantas concentradoras : Caso: Concentradora Los Colorados de Minera Escondida - BHP*. Universidad de Chile, Santiago de Chile. doi:10.58011/n7bs-tq91
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Elsevier.
- Moran, R. E. (2021). *The Cost of Mining: Environmental and Social Impacts of Mineral Extraction*. Springer.
- Moyano, F., & Villamil, D. (2021). *Análisis del ciclo PHVA en la gestión de proyectos, una revisión documental*. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. doi:<https://doi.org/10.33571/rpolitec.v17n34a4>
- Muñoz-Kappes, C. (2025). Copper mining costs in Chile have increased more than in the rest of the world. *PLUSMINNING*.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.

- Nilo, E. (2006). *Congreso de Mantenedores de Planta*.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2020). *Economic Contributions of the Mining Industry*. Obtenido de <https://www.oecd.org/en/about.html>
- Park, C. (2022). *Contemporary Engineering Economics* (7th ed.). Pearson.
- Salas, L. (2016). *Análisis técnico-económico de la gestión de activos mineros móviles para la determinación del reemplazo económico óptimo de los equipos*. Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141003>
- SERNAGEOMIN. (2023). Obtenido de <https://www.sernageomin.cl/informe-anual-de-gestion-de-relaves/>
- Silva, A., Medeiros, C., & Vieira, R. (2017). *Cleaner production and PDCA cycle: Practical application for reducing*.
- Soto. (2018). *Criterios de reemplazo de chancadores de cono en plantas de procesamiento: caso Planta Concentradora División Norte*. Revista de Ingeniería y Mantenimiento.
- Soto, M. &. (2018). *Criterios de reemplazo de chancadores de cono en plantas de procesamiento: caso Planta Concentradora División Norte*. Revista de Ingeniería y Mantenimiento.
- Soto, M. V. (2021). *Implementación del sistema de bloqueo y etiquetado (LOTO) en áreas de chancado: impactos en la reducción de incidentes*. Revista Técnica de Seguridad Industrial.
- Tintaya Antapaccay. (2020). *Manual de Operación de Planta Concentradora*. Huancané, Perú. Obtenido de <https://vsip.info/110-descripcion-del-area-chancado-pdf-free.html>
- Triola, M. (2018). *Elementary statistics* (13th ed.). Pearson.
- UNEP. (2022). Obtenido de <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>
- UNEP, U. N. (2024). *Critical energy transition minerals*.
- WECERT. (2024). *Adapting to ISO 55001:2024*. 7.
- Wireman, T. (2004). *Benchmarking Best Practices in Maintenance Management*. Industrial Press.

- Wood Mackenzie. (2023). *Copper Mining Cost Benchmarking Analysis: Global Production Trends and Cost Curves 2023-2035*. Obtenido de <https://www.woodmac.com/reports/metals-mining-copper-mining-cost-benchmarking-analysis-2023-123456>
- World Bank. (2020). Obtenido de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34670>
- Zavala, C. (2018). *Plan de mantenimiento preventivo basado en RCM para el chancador primario Fuller, Operación Mantoverde*. Valparaíso, Chile. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11673/40797>
- Zavala, C. (2018). *Plan de mantenimiento preventivo basado en RCM para el chancador primario Fuller, Operación Mantoverde*. Valparaíso, Chile. Obtenido de https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/6700/F.Campoverde_Tesis_Titulo_Profesional_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y