



DEPARTAMENTO DE
INGENIERIA COMERCIAL
UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Ingeniería Comercial

MBA, Magíster en Gestión Empresarial

Gestión de Repuestos Críticos y Esenciales para la Gran Minería en Chile conforme a la norma ISO 55000

Tesina de Grado presentada por

ALVARO MARCELO PRIETO ELKINS

Como requisito para optar al grado de

MBA, Magíster en Gestión Empresarial

Guía de Tesina Mg Francisco Lagos Peralta

Septiembre de 2026

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME A LA
NORMA ISO 55000

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: Gestión de Repuestos Críticos y Esenciales para la Gran Minería en Chile conforme a la norma ISO 55000

Nombre del candidato(a): Alvaro Marcelo Prieto Elkins

Carrera / Grado: MBA, Magister en Gestión Empresarial

Campus: Valparaíso

Departamento: Ingeniería Comercial

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, _Francisco Omar Lagos Peralta_ 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 (marcar una opción)

☒ 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 (marcar una opción):

☐ 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

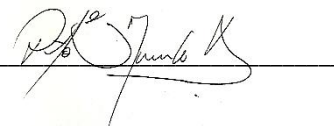
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: _03-09-2026_ Firma: _____



Estudiante o Candidato(a):

Fecha: _04-09-2026_ Firma: _____



**TITULO DE TESINA: “Gestión de Repuestos Críticos y Esenciales para la
Gran Minería en Chile conforme a la norma ISO
55000”**

AUTOR: ALVARO MARCELO PRIETO ELKINS

TRABAJO DE TESINA, presentando en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de
MBA, Magíster en Gestión Empresarial de la Universidad Técnica Federico Santa María.

OBSERVACIONES: _____

COMISIÓN DE TESINA:

Profesor Guía: Mg. Francisco Lagos Peralta

Correferente Externo: Mg. René Romo

Correferente Interno: Dr. Lionel Valenzuela

Valparaíso, septiembre 2026

GESTIÓN DE REPUESTOS CRITICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME
A LA NORMA ISO 55000

(Modelo de la tercera hoja interior: Responsabilidad)

Todo el contenido, análisis,
conclusiones y opiniones vertidas en
este estudio son de mi exclusiva
responsabilidad.

Nombre: Alvaro Marcelo Prieto Elkins.

Fecha: 02-09-2026.

Tabla de contenido

Departamento de Ingeniería Comercial MBA, Magíster en Gestión Empresarial.....	1
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN 1.1. Contexto general de la gestión de activos en minería.....	14
1.2. Importancia de los repuestos críticos en la minería chilena	14
1.3. Planteamiento del problema	14
1.4. Pregunta de investigación	15
1.5. Objetivos del estudio	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
1.6. Justificación estratégica del estudio (nueva sección)	16
1.7. Relevancia para la minería chilena post 2025	16
1.8. Estructura del documento	16
CAPÍTULO 2 – MARCO NORMATIVO Y ESTÁNDARES APLICABLES	17
2.1. Norma ISO 55000: Principios de la Gestión de Activos	17
2.1.1. Alcance de ISO 55000.....	17
2.1.2. Principios esenciales de ISO 55000.....	18
2.2. Norma ISO 55001: Requisitos del Sistema de Gestión de Activos	18
2.2.1. Alineación con la gestión de repuestos críticos	18
2.2.2. Ciclo de vida y decisiones basadas en evidencia	19
2.3. Norma ISO 22301: Continuidad Operacional	19
2.3.1. Relación entre continuidad operacional y repuestos críticos	19
2.4. Marco regulatorio chileno aplicable (Revisión y ampliación)	20
2.5. Integración entre los estándares (Nuevo subcapítulo)	20
ISO 55000	20
ISO 55001	20
ISO 22301	20
CAPÍTULO 3 – CONTEXTO DE LA MINERÍA CHILENA	21
3.1. Panorama general de la minería en Chile	21
3.2. Estructura productiva de una planta concentradora	21
3.3. Complejidad logística en operaciones mineras	21
3.3.1. Ubicación remota y accesos limitados	22

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME
A LA NORMA ISO 55000

3.3.2. Dependencia de proveedores internacionales.....	22
3.3.3. Variabilidad de la cadena marítima.....	22
3.4. Restricciones operacionales propias del entorno minero (Nuevo subcapítulo).....	22
3.5. Cadena de suministro minera: vulnerabilidades estructurales	23
3.5.1. Lead times inciertos.....	23
3.5.2. Bajos niveles de stock local	23
3.5.3. Dependencia de OEMs.....	23
3.5.4. Costos de transporte elevados	23
3.6. Importancia de la continuidad operacional	23
3.7. Alineación del contexto minero con esta tesina	24
CAPÍTULO 4 – METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS.....	24
4.1. Enfoque de priorización basada en criticidad	24
4.1.1. Matrices de decisión (revisado).....	25
4.1.2. Fichas de priorización (nuevo).....	25
4.2. Análisis de fallas y confiabilidad.....	26
4.2.1. FMEA (Revisado y ampliado).....	26
4.3.1. Distribución Weibull	27
4.3.2. Curvas de probabilidad.....	28
4.4. Mantenimiento preventivo y planificado.....	28
4.4.1. Integración con el plan PM	28
4.4.2. Frecuencias y ventanas de mantenimiento.....	28
4.5. Herramientas digitales: SAP PM, EAM y plataformas avanzadas	29
4.5.1. SAP PM.....	29
4.5.2. EAM (Enterprise Asset Management)	29
4.5.3. Sistemas predictivos	29
4.6. Sesgos humanos y riesgos metodológicos en la criticidad (Nuevo y muy importante)...	29
4.7. Integración final de la metodología (Cierre del capítulo)	30
CAPÍTULO 5 – PLAN DE GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS	30
5.1. Determinación del inventario óptimo	31
5.1.1. Stock óptimo	31
5.1.2. Punto de pedido (ROP)	31
5.1.3. Stock de seguridad.....	32
5.2. Estrategias de abastecimiento y proveedores estratégicos.....	32
5.2.1. Criterios de selección de proveedores	32
5.2.2. Evaluación periódica de desempeño	32

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME
A LA NORMA ISO 55000

5.2.3. Gestión de contratos y acuerdos de disponibilidad	33
5.3. Almacenamiento, trazabilidad y control de calidad	33
5.3.1. Protocolos de recepción	33
5.3.2. Condiciones de almacenamiento	33
5.3.3. Control de obsolescencia	34
5.4. Estrategias de Inventario: Push, Pull y Híbridos.....	34
Estrategia Push (anticipada)	34
Estrategia Pull (demanda real)	34
Modelo híbrido (minería 2025 real)	34
5.5. Inventario inteligente basado en condición y datos (Nuevo y moderno)	35
5.6. Lead time real vs lead time contractual (Muy importante)	35
5.7. Integración final del plan de gestión	36
CAPÍTULO 6 – NORMA ISO 55001 Y SU APLICACIÓN EN REPUESTOS CRÍTICOS	36
6.1. Rol de ISO 55001 en la gestión de activos mineros	36
6.2. Política y objetivos del Sistema de Gestión de Activos	37
6.3. Planificación del Sistema de Gestión de Activos	37
6.4. Roles, responsabilidades y competencias (Nuevo subcapítulo)	38
Mantenimiento	38
Operaciones	38
Abastecimiento	38
Finanzas	38
Planificación	38
6.5. Información documentada y trazabilidad	38
6.6. Control operacional en repuestos críticos	39
6.7. Evaluación del desempeño (Nuevo subcapítulo)	39
KPIs recomendados en minería:	39
6.8. Auditorías y revisión por la dirección (Nuevo subcapítulo clave)	40
Auditoría interna	40
Auditoría externa	40
Revisión por la Dirección	40
6.9. Ciclo de vida de los activos y repuestos críticos (expansión profunda)	40
6.10. Integración con ISO 22301 y continuidad operacional	41
6.11. Aplicación real en minería chilena	41
6.12. Cierre del capítulo	42
CAPÍTULO 7 – ISO 22301 Y CONTINUIDAD OPERATIVA	42

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME
A LA NORMA ISO 55000

7.1. Propósito del estándar ISO 22301	42
7.2. Identificación de procesos críticos en minería	43
7.3. Evaluación de vulnerabilidades operacionales	43
7.4. Resiliencia de la cadena de suministro en minería	43
7.4.1. Lead times prolongados e inciertos	44
7.4.2. Dependencia de OEM internacionales	44
7.4.3. Riesgos marítimos	44
7.4.4. Baja disponibilidad nacional de repuestos complejos	44
7.4.5. Riesgo de interrupciones globales	44
7.5. Planes de continuidad operacional	44
7.6. Análisis de escenarios y estimación de impacto	45
7.7. Capacidad de recuperación (Recovery Capability)	45
7.8. Integración entre ISO 22301 e ISO 55001	46
7.9. Aplicación práctica en minería chilena	46
7.10. Cierre del capítulo	46
CAPÍTULO 8 – CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO EN LA MINERÍA	47
8.1. Fundamentos de la confiabilidad operativa	47
8.2. Indicadores clave: MTBF y MTTR	48
8.2.1. MTBF: Mean Time Between Failures	48
8.2.2. MTTR: Mean Time To Repair	48
8.3. Curvas de falla y distribución Weibull	49
8.4. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	49
8.5. Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA/FMEDA)	50
8.5.1. FMEA tradicional	50
8.5.2. FMEDA (versión avanzada)	50
8.6. Confiabilidad basada en condición (CBM)	50
8.7. Estrategias de mantenimiento aplicadas en minería	51
8.7.1. Mantenimiento preventivo	51
8.7.2. Mantenimiento predictivo	51
8.7.3. Mantenimiento correctivo	51
8.7.4. Mantenimiento proactivo	51
8.8. Relación entre confiabilidad e inventario crítico	51
8.9. Indicadores avanzados para minería 2025 (nuevo)	51
8.10. Minería 4.0 aplicada a confiabilidad (nuevo)	52
8.11. Cierre del capítulo	52

CAPÍTULO 9 – MODELOS CUANTITATIVOS DE INVENTARIO	53
9.1. Modelo EOQ (Economic Order Quantity)	53
9.1.1. EOQ Modificado para minería (nuevo y muy importante)	54
9.2. Punto de pedido (ROP: Reorder Point)	54
9.2.1. ROP ajustado por variabilidad del lead time	54
9.3. Stock de seguridad (SS)	55
En minería:	55
9.4. Modelos probabilísticos aplicados en minería (nuevo subcapítulo técnico)	55
9.4.1. Distribución Poisson	56
9.4.2. Distribución Binomial Negativa	56
9.4.3. Aproximación normal	56
9.5. Análisis de riesgo financiero del inventario (nuevo)	56
Costo de no disponibilidad (CND):	56
9.6. Sensibilidad del inventario frente al lead time (nuevo subcapítulo clave)	57
9.7. Evaluación costo-beneficio del inventario crítico (nuevo)	57
9.8. Modelos avanzados para minería 2025 (nuevo y moderno)	58
9.8.1. Monte Carlo	58
9.8.2. Digital Twins	58
9.8.3. Machine Learning	58
9.9. Integración del modelo cuantitativo con el sistema de criticidad	58
9.10. Cierre del capítulo	59
CAPÍTULO 10 – RELACIÓN ENTRE INVENTARIO Y RIESGO OPERATIVO	59
10.1. Concepto de riesgo operativo	59
10.1.1. Riesgo técnico vs riesgo logístico	60
10.2. Impacto operacional de una falla sin repuesto crítico	60
10.3. Clasificación del riesgo aplicado a repuestos críticos	61
10.3.1. Riesgo catastrófico	61
10.3.2. Riesgo alto	61
10.3.3. Riesgo medio	61
10.3.4. Riesgo bajo	61
10.4. Modelos de probabilidad de falla y su relación con inventario	61
Ejemplo práctico: sello mecánico	61
Ejemplo práctico: piñón de chancador	62
10.5. Evaluación del riesgo logístico (nuevo subcapítulo clave)	62
10.6. Matriz de riesgo para inventarios críticos	62

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME
A LA NORMA ISO 55000

Eje 1: Probabilidad de falla	62
Eje 2: Consecuencia.....	62
10.7. Impacto financiero del riesgo operacional	63
Fórmula general de impacto:.....	63
10.8. Inventario crítico como mitigación de riesgo (subcapítulo ampliado)	63
10.9. Estrategias para reducir riesgo mediante inventario	64
10.9.1. Inventario asegurado.....	64
10.9.2. Inventario condicionado	64
10.9.3. Acuerdos de disponibilidad OEM	64
10.9.4. Inventario en consignación.....	64
10.9.5. Inventario basado en condición (CBM)	64
10.10. Integración del inventario como parte del sistema de continuidad operacional	64
10.11. Cierre del capítulo	65
CAPÍTULO 11 – GESTIÓN INTEGRADA DE ACTIVOS Y REPUESTOS CRÍTICOS.....	65
11.1. Alineación estratégica entre gestión de activos y repuestos críticos	65
11.2. Componentes del sistema integrado de gestión de activos	66
1. Normativa ISO 55001	66
2. Continuidad operacional ISO 22301	66
3. Confiabilidad y mantenimiento (RCM, CBM, FMEA/FMEDA)	66
4. Modelos cuantitativos (EOQ, ROP, SS)	66
5. Cadena logística y proveedores	66
6. Información documentada y SAP PM	66
11.3. Gobernanza del sistema de gestión de repuestos críticos.....	66
Mantenimiento.....	67
Operaciones	67
Abastecimiento.....	67
Logística	67
Finanzas.....	67
Gerencia de Activos	67
11.4. Integración de metodologías: del análisis técnico a la decisión de inventario	68
11.5. Integración digital del sistema (nuevo subcapítulo)	68
11.5.1. SAP PM (núcleo de gestión).....	68
11.5.2. APM (Asset Performance Management).....	68
11.5.3. SCADA + IIoT	69
11.5.4. Digital Twins.....	69

11.6. Marco decisional integrado para repuestos críticos	69
11.7. Flujo documental exigido por ISO 55001.....	70
11.8. Implementación del sistema en minería chilena	70
11.9. Beneficios directos del sistema integrado.....	71
11.10. Cierre del capítulo	71
CAPÍTULO 12 – ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE REPUESTOS	71
12.1. Descripción de los repuestos seleccionados.....	71
12.1.1. Piñón del Chancador Primario	72
12.1.2. Sello Mecánico de Bomba Cyclone-Feed.....	72
12.2. Parámetros comparativos críticos (tabla central del capítulo)	72
12.3. Evaluación cuantitativa del impacto económico	73
12.3.1. Piñón del Chancador Primario	73
Cálculo de costo esperado anual:	73
12.3.2. Sello Mecánico Bomba Cyclone-Feed.....	73
12.4. Análisis de criticidad integrada.....	73
Resultados:.....	74
Piñón del Chancador Primario	74
Sello Mecánico	74
12.5. Matriz comparativa de riesgos	74
12.6. Aplicación de modelos cuantitativos	74
12.6.1. ROP Piñón Chancador	74
12.6.2. ROP Sello Mecánico	75
12.6.3. Stock de seguridad recomendado	75
12.7. Análisis de sensibilidad	75
Caso 1: Lead time del piñón aumentó a 180 días	75
Caso 2: Bomba cyclone-feed trabaja con pulpa más abrasiva	75
12.8. Resultados generales del análisis comparativo	75
12.9. Cierre del capítulo	76
CAPÍTULO 13 – CONCLUSIONES GENERALES.....	76
13.1. La gestión de repuestos críticos es un pilar de la continuidad operacional	76
13.2. ISO 55001 aporta gobernanza, trazabilidad y disciplina técnica	77
13.3. ISO 22301 complementa ISO 55001 desde la perspectiva de la continuidad.....	77
13.4. Los modelos cuantitativos permiten justificar el inventario con evidencia	77
13.5. La confiabilidad operacional es la base técnica del inventario crítico	78
13.6. La cadena logística es un factor crítico en el análisis de riesgo.....	78

13.7. El análisis comparativo demuestra la necesidad de decisiones diferenciadas	79
13.8. Un sistema integrado es la única forma de asegurar decisiones consistentes.....	79
13.9. Recomendaciones clave para la industria minera.....	80
1. Mantener inventarios asegurados para equipos de impacto catastrófico	80
2. Utilizar lead time real, no contractual, en ROP/SS.....	80
3. Implementar monitoreo predictivo para repuestos de desgaste.	80
4. Realizar workshops de criticidad integrados entre áreas.	80
5. Validar inventarios con análisis costo-beneficio.	80
6. Incorporar auditorías internas trimestrales ISO 55001.	80
7. Formalizar fichas de criticidad por cada repuesto crítico.	80
8. Adoptar modelos híbridos Push/Pull.	80
13.10. Cierre general	80
CAPÍTULO 14 – TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y MINERÍA 4.0 EN LA GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS.....	81
14.1. Evolución hacia Minería 4.0	81
14.2. Internet Industrial de las Cosas (IIoT)	81
Aplicación en repuestos críticos:	81
14.3. Machine Learning para predicción de fallas	82
Algoritmos típicos:	82
Resultados:.....	82
14.4. Digital Twins (Gemelos Digitales)	82
Aplicación en repuestos críticos:	83
14.5. Asset Performance Management (APM).....	83
Beneficios:.....	83
14.6. Integración OT/IT en minería (nuevo).....	83
Ejemplo:	84
14.7. Automatización logística y robótica.....	84
14.8. Blockchain para trazabilidad de repuestos.....	84
14.9. Uso de Big Data en decisiones de inventario.....	85
14.10. Modelos predictivos para inventarios críticos	85
Modelo 1: Inventario Basado en Vida Útil Remanente (RUL)	85
Modelo 2: Inventario Basado en Probabilidad Dinámica de Falla (PdF)	85
Modelo 3: Inventario Basado en Riesgo Sostenido	86
14.11. Minería autónoma y su impacto en repuestos críticos	86
14.12. Desafíos de implementación digital	86

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME
A LA NORMA ISO 55000

14.13. Hoja de ruta recomendada para una operación minera real	86
Fase 1 (0–6 meses):	86
Fase 2 (6–18 meses):	86
Fase 3 (18–36 meses):	87
14.14. Cierre del capítulo y visión futura	87
15. BIBLIOGRAFÍA	87
15.1. Normas y estándares internacionales	87
15.2. Gestión de activos y confiabilidad	88
15.3. Inventarios, logística y modelos cuantitativos	88
15.4. Riesgo operacional y continuidad	89
15.5. Minería, mantenimiento y cadena de suministro	89
15.6. Transformación digital, Minería 4.0 y analítica avanzada	89
15.7. Contexto chileno y regulatorio	90

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto general de la gestión de activos en minería

La minería chilena opera bajo un modelo industrial altamente intensivo en activos físicos. Plantas concentradoras, equipos de gran tonelaje, sistemas de chancado, molienda, flotación, bombeo y transporte constituyen una red compleja cuya continuidad operacional determina directamente la productividad del negocio. En este entorno, la gestión de activos se transforma en un elemento estratégico, no solo para asegurar el desempeño técnico de los equipos, sino también para garantizar la estabilidad económica de las operaciones.

Los estándares internacionales, en especial **ISO 55000**, establecen un marco que orienta a las organizaciones hacia una administración estructurada de sus activos durante todo su ciclo de vida. Esta perspectiva supera la visión tradicional centrada únicamente en mantenimiento y permite integrar factores como disponibilidad, riesgo, confiabilidad, logística y costos totales de propiedad. Bajo este enfoque, la gestión de repuestos críticos surge como un componente fundamental para sostener la continuidad operacional del proceso minero.

1.2. Importancia de los repuestos críticos en la minería chilena

La minería opera en un contexto donde el costo por hora de detención puede superar fácilmente los cien mil dólares, dependiendo de la capacidad y madurez de la operación. En plantas concentradoras, la dependencia de equipamientos de alta complejidad técnica implica que la falla de un solo componente puede comprometer toda la cadena de valor. Por ello, los repuestos críticos representan un mecanismo de mitigación del riesgo operacional.

La criticidad de un repuesto no se define por su valor económico ni por su frecuencia de uso, sino por la magnitud del impacto que genera su indisponibilidad. Componentes como el piñón del chancador primario, los rodamientos principales, los sellos mecánicos de bombas y ciertos elementos electrónicos de control pueden paralizar completamente la operación si no se encuentran disponibles en el momento preciso.

1.3. Planteamiento del problema

A pesar de la relevancia estratégica de los repuestos críticos, muchas compañías mineras enfrentan desafíos recurrentes para gestionarlos adecuadamente. Entre los problemas comunes se encuentran:

- Falta de metodologías formales para determinar criticidad.
- Descoordinación entre áreas de mantenimiento, operaciones, logística y finanzas.
- Dependencia de proveedores internacionales con tiempos de reposición extensos.
- Prácticas de inventario basadas en intuición o experiencia individual.
- Limitado uso de modelos cuantitativos y análisis de riesgo.
- Insuficiente integración con los lineamientos de ISO 55000 e ISO 55001.

Estas brechas generan exposición a detenciones no programadas, sobrecostos logísticos, decisiones inconsistentes y pérdida de continuidad operacional.

1.4. Pregunta de investigación

¿Cómo aplicar un enfoque integral basado en ISO 55000, modelos cuantitativos, análisis de riesgo y gestión de activos para optimizar la gestión de repuestos críticos en una planta concentradora de la minería chilena?

Esta pregunta busca articular ingeniería, logística, economía y gobernanza bajo un marco metodológico coherente y replicable.

1.5. Objetivos del estudio

Objetivo general

Desarrollar un modelo integral para la gestión de repuestos críticos en minería basado en normas internacionales, análisis cuantitativo, criterios de confiabilidad y evaluación del riesgo operacional.

Objetivos específicos

- Identificar los principios clave de ISO 55000 e ISO 55001 aplicables a repuestos críticos.
- Analizar el impacto de la continuidad operativa mediante ISO 22301.
- Evaluar la confiabilidad y mantenibilidad de los activos principales de planta.
- Aplicar modelos cuantitativos (EOQ, ROP y stock de seguridad) ajustados al contexto minero.
- Comparar dos repuestos críticos (piñón de chancador vs sello mecánico de bomba cyclone-feed).
- Formular recomendaciones para mejorar políticas de inventario y gestión de riesgo.

1.6. Justificación estratégica del estudio (nueva sección)

La minería chilena enfrenta crecientes desafíos en materia de productividad, costos y estabilidad operativa. Las exigencias globales, los ciclos del precio del cobre y la presión competitiva internacional obligan a adoptar modelos de gestión más sofisticados. En este contexto, la correcta gestión de repuestos críticos cumple un doble propósito:

1. **Asegurar continuidad operacional**, evitando detenciones no programadas altamente costosas.
2. **Optimizar recursos financieros**, reduciendo capital inmovilizado sin comprometer disponibilidad.

El estudio se justifica por la necesidad de contar con metodologías sólidas, alineadas a estándares internacionales, que permitan tomar decisiones basadas en análisis técnico y no en criterios subjetivos.

1.7. Relevancia para la minería chilena post 2025

La relevancia del estudio crece aún más en el contexto actual (2025), caracterizado por:

- Lead times internacionales cada vez más variables.
- Falta de mano de obra especializada para mantenimientos mayores.
- Mayor adopción de tecnologías predictivas y exigencia de trazabilidad.
- Regulaciones ambientales y de seguridad más estrictas.
- Operaciones que funcionan cerca de su capacidad máxima.

Todo esto eleva la necesidad de tener repuestos críticos disponibles en el momento adecuado, bajo modelos basados en evidencia y estándares globales.

1.8. Estructura del documento

El estudio se organiza en 13 capítulos más anexos:

- Capítulos 2–4: fundamentos teóricos, normativos y metodológicos.
- Capítulos 5–10: aplicación práctica de gestión, inventarios, confiabilidad y riesgo.
- Capítulo 11: caso comparativo entre dos repuestos críticos reales.
- Capítulos 12–13: discusión y conclusiones.
- Capítulo 14 (final): Transformación Digital y Minería 4.0.

CAPÍTULO 2 – MARCO NORMATIVO Y ESTÁNDARES APLICABLES

2.1. Norma ISO 55000: Principios de la Gestión de Activos

La norma ISO 55000 establece los fundamentos conceptuales de la gestión de activos, definiendo principios que orientan a las organizaciones hacia la administración estratégica de sus activos físicos durante todo su ciclo de vida. Su propósito es asegurar que los activos contribuyan al valor organizacional mediante decisiones basadas en riesgo, costo y desempeño.

ISO 55000 introduce conceptos esenciales como:

- **Enfoque de ciclo de vida completo**, desde adquisición hasta retiro.
- **Integración entre áreas**, evitando decisiones aisladas en mantenimiento, abastecimiento u operaciones.
- **Alineación con los objetivos corporativos**, priorizando decisiones que fortalezcan la continuidad operacional.
- **Valor como eje central**, entendido como la capacidad del activo para apoyar el cumplimiento de metas estratégicas.

Para la minería, la norma representa un cambio de paradigma: pasar de mantener activos a **gestionar valor**, donde los repuestos críticos se consideran parte integral del desempeño de activos mayores (chancadores, molinos, bombas, sistemas de flotación, etc.).

2.1.1. Alcance de ISO 55000

ISO 55000 no prescribe técnicas específicas, sino un marco general aplicable a cualquier industria. En minería, su alcance incluye:

- Equipos de proceso (chancado, molienda, flotación).
- Equipos de soporte (bombeo, sistemas eléctricos, instrumentación).
- Infraestructura operacional.
- Sistemas de información asociados a activos.
- Gestión de repuestos, consumibles y partes críticas.

El estándar exige que las decisiones sobre inventario, reemplazo, mantenimiento y adquisición sean coherentes con la estrategia global de la empresa.

2.1.2. Principios esenciales de ISO 55000

Los principios centrales aplicados a repuestos críticos son:

- **Transparencia y trazabilidad** en decisiones de inventario.
- **Gestión basada en riesgo** antes que en percepción.
- **Coordinación interáreas** como mecanismo estructural, no opcional.
- **Uso de información documentada** para soportar decisiones.
- **Mejora continua** mediante auditorías y revisión sistemática.

ISO 55000 permite justificar de manera formal la mantención de repuestos críticos de alto costo, demostrando que su valor supera ampliamente su costo de almacenamiento.

2.2. Norma ISO 55001: Requisitos del Sistema de Gestión de Activos

Mientras ISO 55000 define los principios, **ISO 55001 establece los requisitos formales** para implementar un Sistema de Gestión de Activos (SGA) verificable y auditable.

Para la minería, ISO 55001 exige:

- Políticas y objetivos claros de gestión de activos.
- Procesos documentados para planificación, operación, control y mejora.
- Roles y responsabilidades definidos.
- Control operacional sobre inventarios y repuestos críticos.
- Evaluación de desempeño y gestión del riesgo.
- Integración total con mantenimiento, operaciones y logística.

2.2.1. Alineación con la gestión de repuestos críticos

La norma obliga a que:

1. **La criticidad esté documentada**, no basada en opinión.
2. **El inventario se determine a partir de datos**, no de hábitos o cultura interna.
3. **Los tiempos de reposición (lead times)** sean considerados formalmente en la planificación.
4. **Los riesgos operacionales** sean evaluados antes de ajustar inventarios.
5. **Las brechas en disponibilidad** tengan planes de acción asociados.

ISO 55001 convierte la gestión de repuestos críticos en un proceso auditable, estratégico y orientado al valor.

2.2.2. Ciclo de vida y decisiones basadas en evidencia

ISO 55001 exige que todas las decisiones estén justificadas por:

- Datos de confiabilidad (MTBF, Weibull, modos de falla).
- Historial de mantenimientos.
- Participación de las áreas claves.
- Resultados financieros esperados.
- Impacto en la continuidad operacional.

Esto permite justificar inventario asegurado para componentes cuya falla tendría impacto catastrófico, incluso si su uso es esporádico.

2.3. Norma ISO 22301: Continuidad Operacional

ISO 22301 complementa a ISO 55001 al enfocarse específicamente en la **continuidad del negocio**, un objetivo esencial en minería donde la detención de equipos primarios genera pérdidas significativas.

Los ejes centrales del estándar son:

- Identificación de procesos críticos.
- Evaluación de vulnerabilidades operacionales.
- Resiliencia frente a interrupciones internas y externas.
- Planes de respuesta y recuperación.

En minería, la continuidad operacional depende directamente de la existencia de repuestos críticos disponibles. ISO 22301 fortalece esta perspectiva al exigir que los riesgos asociados a la cadena de suministro sean evaluados de manera sistemática.

2.3.1. Relación entre continuidad operacional y repuestos críticos

La norma establece que:

- La falla sin repuesto crítico **es una vulnerabilidad inaceptable**.
- La cadena logística debe ser evaluada por riesgo, no por costo.
- Los repuestos con lead times prolongados requieren inventario asegurado.
- Los planes de continuidad deben incluir inventarios específicos para fallas de alto impacto.

ISO 22301 eleva la gestión de repuestos críticos a nivel estratégico corporativo.

2.4. Marco regulatorio chileno aplicable (Revisión y ampliación)

Aunque Chile no posee una norma específica que regule inventarios de repuestos, sí existen marcos legales y estructuras regulatorias que impactan indirectamente esta gestión:

- **Ley 19.300** y normas ambientales: afectan almacenamiento y disposición final.
- **Reglamento de seguridad minera (DS 132)**: exige cumplimiento de estándares de seguridad operacional.
- **Ley de Subcontratación** y registros de proveedores: determinan la calidad y trazabilidad de OEM y servicios asociados.
- **Normativa de transporte de cargas peligrosas**: relevante para lubricantes, químicos y repuestos sensibles.

Si bien estas regulaciones no determinan “qué repuestos mantener”, sí condicionan **cómo deben almacenarse, registrarse y controlarse**, siendo parte del ciclo de vida documentado por ISO 55001.

2.5. Integración entre los estándares (Nuevo subcapítulo)

La gestión moderna en minería requiere integrar los tres marcos:

ISO 55000

Define el porqué: gestión de activos para generar valor.

ISO 55001

Define el cómo: requisitos, roles, procesos, auditorías.

ISO 22301

Define el para qué: continuidad operacional y resiliencia del negocio.

Los tres estándares se complementan, creando una estructura donde:

- La criticidad se fundamenta (ISO 55000).
- La decisión de inventario se gobierna (ISO 55001).
- El impacto operacional se gestiona (ISO 22301).

Este marco integrado es el que sustenta todo el análisis de los capítulos posteriores.

CAPÍTULO 3 – CONTEXTO DE LA MINERÍA CHILENA

3.1. Panorama general de la minería en Chile

La minería es el pilar económico más relevante de Chile, representando cerca del 10% del PIB nacional y más de la mitad de sus exportaciones. El país se mantiene como el principal productor mundial de cobre, lo que implica operar grandes instalaciones industriales en ambientes geográficamente desafiantes: altitudes elevadas, condiciones extremas de temperatura, disponibilidad limitada de agua y una creciente presión por eficiencia energética.

El proceso productivo minero exige continuidad operacional, ya que la detención de cualquier unidad crítica afecta directamente el flujo de mineral y, por ende, la rentabilidad del negocio. Este contexto vuelve especialmente relevante la gestión de activos, la confiabilidad operacional y la administración profesional de repuestos críticos.

3.2. Estructura productiva de una planta concentradora

Las plantas concentradoras procesan mineral sulfurado mediante un flujo continuo compuesto por chancado, molienda, clasificación, flotación y espesamiento. Cada una de estas etapas depende de equipos de gran tamaño y alta especialización:

- **Chancado primario:** rompe el mineral de gran tamaño; su detención paraliza todo el proceso.
- **Molienda SAG y bolas:** reduce el mineral a tamaños micrométricos.
- **Bombeo y ciclones:** distribuyen pulpa y regulan la granulometría.
- **Flotación:** separa minerales valiosos mediante reactivos químicos.
- **Espesadores y filtrado:** acondicionan el concentrado para su transporte.

La continuidad de este flujo depende de una enorme cantidad de componentes mecánicos, eléctricos e instrumentales que deben funcionar de manera estable. Cualquier falla sin repuesto disponible puede provocar pérdidas operacionales significativas.

3.3. Complejidad logística en operaciones mineras

A diferencia de otras industrias, la minería chilena opera en condiciones logísticas particularmente desafiantes:

3.3.1. Ubicación remota y accesos limitados

La mayoría de las faenas se ubican en zonas alejadas de centros urbanos, con poca disponibilidad de transporte terrestre y tiempos de traslado extensos. Esto afecta:

- la llegada de repuestos,
- la capacidad de respuesta de proveedores,
- y la planificación de inventarios.

3.3.2. Dependencia de proveedores internacionales

Gran parte de los repuestos de mayor complejidad (piñones, ejes, rodamientos especiales, sellos de alta presión, liners, etc.) provienen de:

- Estados Unidos,
- Canadá,
- Alemania,
- Finlandia,
- Suecia,
- China.

El lead **times** pueden superar los 90–150 días, y varían según demanda global, capacidad de fabricación y congestión portuaria.

3.3.3. Variabilidad de la cadena marítima

Factores que afectan directamente a la minería:

- Disponibilidad de contenedores.
- Huelgas portuarias.
- Fluctuaciones del mercado naviero global.
- Aumento de costos logísticos internacionales.

Todo esto incrementa la exposición al riesgo de quiebres de stock y refuerza la necesidad de mantener repuestos críticos en bodega.

3.4. Restricciones operacionales propias del entorno minero (Nuevo subcapítulo)

La minería chilena opera con condiciones intermedias y extremas que aceleran el desgaste de los activos:

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME A LA NORMA ISO 55000

- Altitudes sobre 3.000 metros: afectan sellos, bombeo y vibraciones.
- Temperaturas extremas: reducen vida útil de componentes elásticos.
- Polvo abrasivo: incrementa desgaste en rodamientos y elementos móviles.
- Agua de proceso con carga sólida: eleva erosión en bombas y ductos.

Estas condiciones justifican mantener repuestos críticos estratégicos incluso cuando su MTBF en otros países sería mayor.

3.5. Cadena de suministro minera: vulnerabilidades estructurales

La minería depende de una cadena de suministro que debe funcionar de manera continua y sin interrupciones. Entre las vulnerabilidades frecuentes:

3.5.1. Lead times inciertos

Los plazos pueden variar entre:

- 3 semanas para repuestos estándar de stock local.
- 12 semanas para componentes mecanizados.
- 20 semanas o más para repuestos OEM críticos.

3.5.2. Bajos niveles de stock local

Muchos proveedores nacionales operan bajo modelos **just-in-time**, lo cual es peligroso para minería pesada.

3.5.3. Dependencia de OEMs

La fabricación de repuestos críticos exige especificaciones que solo el fabricante original puede cumplir. Esto limita alternativas y obliga a anticipar compras.

3.5.4. Costos de transporte elevados

Los costos de flete, seguros y embalaje aumentan cada año, impactando directamente el TCO de los repuestos.

3.6. Importancia de la continuidad operacional

La continuidad operacional depende de:

- disponibilidad física de equipos,
- tiempos de ciclo estables,
- ausencia de cuellos de botella críticos.

La minería chilena opera con un margen operacional estrecho: interrupciones de 1–2 horas pueden traducirse en pérdidas significativas de producción. Esto explica por qué:

- La gestión de repuestos críticos es una **decisión estratégica**,
- El inventario debe sustentarse con análisis cuantitativos,
- Y el riesgo operacional debe ser tan importante como el costo financiero.

3.7. Alineación del contexto minero con esta tesina

Este capítulo establece el escenario en el cual opera tu estudio:

1. **Alta dependencia de equipos críticos**
2. **Condiciones extremas que aceleran el desgaste**
3. **Lead times prolongados e inciertos**
4. **Costos de detención extremadamente altos**
5. **Movilización logística compleja**

Bajo este contexto:

- Gestionar repuestos críticos es indispensable.
- No hacerlo genera riesgos que exceden ampliamente el costo de mantener inventario.
- ISO 55000, ISO 55001 y ISO 22301 dan estructura al proceso.
- El análisis comparativo que se hará en capítulos posteriores es totalmente justificable.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS

La correcta identificación de repuestos críticos constituye la base de una gestión de activos madura. Un sistema de inventario solo es eficiente si distingue claramente qué repuestos son esenciales para la continuidad operacional y cuáles requieren estrategias logísticas o preventivas diferenciadas. Este capítulo presenta una metodología integral, combinando lineamientos normativos, análisis de confiabilidad y herramientas cuantitativas, todo orientado al contexto real de una planta concentradora en Chile.

4.1. Enfoque de priorización basada en criticidad

La criticidad se determina evaluando el impacto que genera la falla de un componente sobre la operación, la seguridad, el medio ambiente y los costos. La metodología utilizada en minería integra criterios técnicos y económicos mediante una matriz de evaluación que permite priorizar repuestos según su importancia.

Los factores más comunes utilizados en la minería chilena incluyen:

- **Impacto en la producción:** ¿la falla detiene el proceso completo o afecta parcialmente el rendimiento?
- **Seguridad:** ¿existe riesgo de lesión o integridad humana?
- **Medio ambiente:** ¿la falla podría derivar en un daño ambiental significativo?
- **Confiabilidad del equipo:** frecuencia de fallas y comportamiento histórico.
- **Tiempo de reposición (lead time):** disponibilidad del proveedor, nacional o internacional.
- **Costo del downtime:** impacto económico por hora de detención.
- **Redundancia:** existencia o no de equipos alternativos.

Este enfoque garantiza decisiones basadas en riesgo y no en percepciones individuales.

4.1.1. Matrices de decisión (revisado)

Las matrices de criticidad combinan dos dimensiones principales:

- **Probabilidad de falla (confiabilidad)**
- **Consecuencia operacional (impacto)**

Generalmente se utilizan escalas de 1 a 5 o 1 a 4 para ponderar:

- Severidad
- Ocurrencia
- Detectabilidad
- Lead time
- Reparabilidad

El resultado final clasifica los repuestos como:

- **Críticos**
- **Esenciales**
- **No críticos**

Esta clasificación sirve para asignar políticas de inventario, revisión, inspección y reposición.

4.1.2. Fichas de priorización (nuevo)

La ficha de priorización es un documento estandarizado que contiene:

- Datos técnicos del repuesto
- Equipo asociado

- Función dentro del proceso
- Modos de falla más comunes
- Tiempo asociado al reemplazo
- Tiempos de fabricación
- Costos de adquisición y almacenamiento
- Criterio de criticidad final

Este formato permite auditoría y trazabilidad, alineado con ISO 55001.

4.2. Análisis de fallas y confiabilidad

Los métodos de confiabilidad permiten determinar cómo falla un componente, qué efectos produce, qué probabilidad tiene de que ocurra y qué acciones pueden mitigar el riesgo.

Los más utilizados en minería son:

- **FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)**
- **FMEDA (Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis)**
- **Análisis Weibull**
- **Árboles de fallas**
- **Análisis de sensibilidad operacional**

4.2.1. FMEA (Revisado y ampliado)

FMEA identifica modos de falla, sus causas y efectos. Cada modo de falla se evalúa según:

- **Severidad (S)**
- **Ocurrencia (O)**
- **Detectabilidad (D)**

Se calcula el **RPN (Risk Priority Number)**:

$$\text{RPN} = S \times O \times D$$

Para repuestos críticos, los RPN altos justifican inventario asegurado.

En minería pesada, un RPN con severidad 5 (impacto catastrófico) es suficiente para clasificar un repuesto como crítico, incluso si la ocurrencia es baja.

4.2.2. FMEDA

FMEDA agrega evaluación cuantitativa y diagnóstica:

- Probabilidad de falla por millón de horas
- Efectividad del diagnóstico automático
- Cobertura frente a fallas ocultas
- Riesgo residual asociado al componente

Es utilizado en minería cuando existen:

- Sistemas eléctricos
- Instrumentación
- Válvulas reguladas
- PLC y sistemas de control
- Bombas con monitoreo en línea

Este análisis es especialmente valioso para repuestos de equipos con sensores predictivos.

4.3. Modelos de confiabilidad aplicados a repuestos críticos

Para representar la vida útil de un componente, los modelos más utilizados son:

4.3.1. Distribución Weibull

Permite identificar:

- Falla temprana
- Vida útil estable
- Falla por desgaste

Weibull determina:

- **β (forma):** tipo de falla
- **η (escala):** vida útil característica
- **γ (ubicación):** tiempo mínimo antes de fallar

Esta información define cuándo un repuesto debe estar disponible.

4.3.2. Curvas de probabilidad

La probabilidad acumulada de falla permite:

- Predecir desgaste
- Determinar intervalos óptimos de reemplazo
- Justificar inventarios de seguridad

4.4. Mantenimiento preventivo y planificado

El mantenimiento preventivo influye directamente en la demanda de repuestos críticos. La sincronización entre PM y repuestos permite evitar compras de urgencia, sobre costos logísticos y paradas no programadas.

4.4.1. Integración con el plan PM

Se debe asegurar que:

- Las intervenciones programadas consideren stock disponible.
- Los repuestos críticos estén vinculados al plan PM en SAP PM.
- Los plazos de compra anticipen el lead time real del proveedor.

4.4.2. Frecuencias y ventanas de mantenimiento

Las fallas de componentes como sellos mecánicos, rodamientos o ejes pueden anticiparse mediante monitoreo:

- Vibraciones
- Temperatura
- Pérdida de eficiencia
- Alineación
- Flujos

Esto define cuándo reponer y cuántos repuestos mantener.

4.5. Herramientas digitales: SAP PM, EAM y plataformas avanzadas

Hoy la minería depende de sistemas digitales para gestionar activos:

4.5.1. SAP PM

Permite:

- Registrar fallas
- Crear planes PM
- Asociar repuestos a órdenes
- Registrar MTBF y MTTR
- Mantener listas de materiales (BOM)

4.5.2. EAM (Enterprise Asset Management)

Incluye:

- Análisis predictivo
- KPI de disponibilidad
- Reportabilidad avanzada
- Integración con sensores IIoT

4.5.3. Sistemas predictivos

Se integran señales en línea para estimar:

- Patrones de desgaste
- Vibraciones anormales
- Condiciones de operación extremas

Esto reduce la incertidumbre y mejora la precisión de inventarios.

4.6. Sesgos humanos y riesgos metodológicos en la criticidad (Nuevo y muy importante)

Uno de los grandes problemas en minería es que **la criticidad se define muchas veces por intuición**. Esto genera:

- Sobrestock de componentes poco relevantes.
- Substock de repuestos críticos de alto impacto.

- Decisiones influenciadas por experiencia individual.
- Inconsistencias entre turnos o áreas.
- Falta de trazabilidad documental.

Este subcapítulo es clave porque tu tesina propone un método profesional y auditado.

Los principales sesgos son:

- **Sesgo de disponibilidad:** “como falló el mes pasado, debe ser crítico”.
- **Sesgo de recencia:** sobrevaloración de fallas recientes.
- **Sesgo de antigüedad:** se asume que todo repuesto antiguo es crítico.
- **Sesgo jerárquico:** decisiones tomadas por una sola jefatura sin análisis técnico.

ISO 55001 elimina estos sesgos al exigir metodología formal y decisiones documentadas.

4.7. Integración final de la metodología (Cierre del capítulo)

La identificación de repuestos críticos no es un proceso aislado.

Es el punto donde se integran:

- confiabilidad (FMEA/FMEDA),
- riesgo operacional,
- logística,
- gobernanza ISO,
- y modelos cuantitativos.

El resultado final es una clasificación objetiva que sustenta todas las decisiones de inventario, permitiendo que los repuestos críticos estén disponibles cuando la operación los necesita, evitando detenciones no programadas y reduciendo la exposición al riesgo.

CAPÍTULO 5 – PLAN DE GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS

La eficacia del inventario de repuestos críticos depende de la correcta articulación entre modelos cuantitativos, criterios de criticidad, análisis de riesgo y consideraciones logísticas. En minería, esta planificación debe ser rigurosa, debido a que los costos de detención operativa, los tiempos de reposición y la dependencia de fabricantes internacionales imponen un nivel de exigencia muy superior al de otras industrias. Este capítulo presenta un plan integral de gestión enfocado en repuestos críticos,

incorporando políticas de inventario, estrategias de abastecimiento y mecanismos de control conforme a estándares internacionales.

5.1. Determinación del inventario óptimo

El inventario óptimo no se basa únicamente en minimizar costos, sino en asegurar continuidad operacional. Para ello, se analizan:

- **Demanda esperada**
- **Variabilidad de consumo**
- **Lead time real del proveedor**
- **Costo total de propiedad (TCO)**
- **Confiabilidad del equipo asociado**
- **Riesgo de quiebre de stock**

En operaciones mineras, el inventario óptimo suele ser mayor al sugerido por modelos tradicionales, debido a la criticidad alta de los equipos y a la incertidumbre logística.

5.1.1. Stock óptimo

El stock óptimo ajusta el tamaño del inventario en función del riesgo operacional. La fórmula general considera:

- Consumo promedio
- Stock de seguridad
- Lead time
- Nivel de servicio requerido

En minería, el nivel de servicio debe ser cercano al **100% para repuestos catastróficos**, dado que el impacto financiero de una falla supera ampliamente el costo de almacenamiento.

5.1.2. Punto de pedido (ROP)

El **Reorder Point (ROP)** indica el momento exacto en que debe comenzar la reposición. En minería, el cálculo tradicional se ajusta incorporando:

- Lead time variable
- Frecuencia de fallas
- Eventos no programados
- Riesgo logístico
- Proveedores con fabricación bajo demanda (make-to-order)

Cuando el lead time fluctúa, se recomienda usar el **lead time máximo** y no el promedio, especialmente para repuestos críticos de chancado y molienda.

5.1.3. Stock de seguridad

El stock de seguridad compensa la variabilidad de:

- consumo,
- lead time,
- disponibilidad del proveedor,
- tiempos de aduana,
- retrasos marítimos,
- congestión logística.

Para repuestos críticos, el stock de seguridad se define más por el **impacto económico del downtime** que por la desviación estándar del consumo.

Esto alinea inventario con ISO 55001 y ISO 22301, priorizando continuidad operacional sobre reducción de costos.

5.2. Estrategias de abastecimiento y proveedores estratégicos

5.2.1. Criterios de selección de proveedores

Los proveedores de repuestos críticos deben evaluarse según:

- Capacidad técnica (OEM o equivalente)
- Certificaciones
- Historial de cumplimiento
- Consistencia en lead times
- Capacidad de respuesta ante emergencias
- Garantías de calidad
- Soporte técnico postventa
- Solidez financiera

En minería, depender de un único proveedor es riesgoso; se recomienda mantener **fuentes alternativas** siempre que los requerimientos técnicos lo permitan.

5.2.2. Evaluación periódica de desempeño

Se realizan evaluaciones semestrales o anuales considerando:

- Cumplimiento de plazos
- Calidad del repuesto entregado
- Incumplimientos o fallas posteriores

- Transparencia documental
- Respuesta ante urgencias
- Cumplimiento de estándares de embalaje y trazabilidad

Estas evaluaciones se integran en sistemas como SAP SRM o plataformas EAM.

5.2.3. Gestión de contratos y acuerdos de disponibilidad

Las estrategias de abastecimiento incluyen:

- **Contratos marco** con entregas programadas
- **Consignación** de repuestos críticos en faena
- **Vendor Managed Inventory (VMI)**
- **Service Level Agreements (SLA)** alineados a ISO 55001
- **Seguros logísticos** ante eventos de fuerza mayor

Estas estrategias reducen riesgos y mejoran continuidad operativa.

5.3. Almacenamiento, trazabilidad y control de calidad

Un repuesto crítico **no es crítico si no está en condición de uso**.

Por ello, la bodega debe cumplir estándares de trazabilidad y control.

5.3.1. Protocolos de recepción

- Inspección dimensional
- Validación contra ficha técnica
- Registro fotográfico
- Verificación de sello y embalaje
- Trazabilidad en SAP

Un error en la recepción puede inutilizar un repuesto de USD 300.000.

5.3.2. Condiciones de almacenamiento

Los repuestos críticos requieren:

- Control de humedad
- Control de temperatura
- Posiciones elevadas para evitar contaminación
- Embalaje reforzado
- Rotación según fecha de fabricación

Rodamientos, sellos, motores y componentes electrónicos son especialmente sensibles.

5.3.3. Control de obsolescencia

La obsolescencia es un riesgo silencioso:

- Cambios en diseño OEM
- Descontinuación de modelos
- Restos de inventario de proyectos antiguos

La gestión moderna exige revisión anual del stock para evitar pérdidas.

5.4. Estrategias de Inventario: Push, Pull y Híbridos

En minería, ninguna estrategia clásica funciona sola. Se utiliza una mezcla:

Estrategia Push (anticipada)

Se justifica cuando:

- El lead time es largo
- El repuesto es crítico
- La probabilidad de falla es baja pero el impacto es catastrófico

Ejemplo: **piñón del chancador primario.**

Estrategia Pull (demanda real)

Se usa cuando:

- Hay proveedores locales confiables
- El repuesto tiene alta rotación
- El MTBF es relativamente constante

Ejemplo: **sellos mecánicos y empaquetaduras.**

Modelo híbrido (minería 2025 real)

Combina ambos métodos:

Push para asegurar continuidad

Pull para minimizar costos en repuestos no esenciales

5.5. Inventario inteligente basado en condición y datos

La Minería 4.0 permite integrar datos reales en decisiones de inventario:

- Sensores IIoT
- Vibraciones
- Temperatura
- Presiones
- Corrientes eléctricas
- Parámetros de desgaste
- Historial SAP PM

Esto permite:

- estimar desgaste real,
- predecir fallas,
- anticipar la compra de repuestos,
- reducir compras reactivas,
- optimizar costos de almacenamiento.

5.6. Lead time real vs lead time contractual

En minería, el lead times reales rara vez coinciden con los declarados.

Ejemplo realista:

- Lead time contractual OEM: 90 días
- Lead time real promedio: 120 días
- Lead time máximo histórico: 155 días

Por eso, las mejores prácticas recomiendan:

- planificar con **lead time máximo**
- mantener buffer logístico
- validar con datos históricos propios
- evaluar proveedores cada trimestre

5.7. Integración final del plan de gestión

Este plan une:

- metodologías de criticidad (FMEA, FMEDA),
- modelos cuantitativos (EOQ, ROP, SS),
- lineamientos ISO 55001,
- continuidad operacional (ISO 22301),
- confiabilidad del activo,
- evaluación de proveedor,
- variabilidad logística,
- y TCO.

El resultado es un sistema robusto que asegura que los repuestos críticos estén disponibles en el momento preciso, reduciendo riesgos y protegiendo la continuidad del proceso minero.

CAPÍTULO 6 – NORMA ISO 55001 Y SU APLICACIÓN EN REPUESTOS CRÍTICOS

ISO 55001 constituye el marco operativo más relevante para definir cómo una organización debe estructurar, implementar y mantener un Sistema de Gestión de Activos (SGA) capaz de garantizar el desempeño, la continuidad operacional y la toma de decisiones basadas en evidencia. Para la minería chilena, donde la detención de equipos crítica genera pérdidas significativas, esta norma adquiere un rol central en la gestión de repuestos críticos.

6.1. Rol de ISO 55001 en la gestión de activos mineros

ISO 55001 proporciona un conjunto de **requisitos verificables y auditables** que obligan a las organizaciones a estructurar sus decisiones sobre activos, integrando factores técnicos, económicos y de riesgo. A diferencia de ISO 55000 (que describe principios), ISO 55001 **exige implementación real**, con evidencia documental y mejora continua.

En el contexto minero, ISO 55001 influye directamente en:

- La planificación del ciclo de vida de repuestos.
- La definición de roles y responsabilidades.

- La coordinación entre mantenimiento, operaciones, abastecimiento y logística.
- La integración entre criticidad, inventarios y continuidad operacional.
- La trazabilidad total de decisiones.

6.2. Política y objetivos del Sistema de Gestión de Activos

ISO 55001 exige una **política formal de gestión de activos**, aprobada por la alta dirección, donde se establezcan:

- Compromisos con la continuidad operacional.
- Criterios de criticidad.
- Prioridades de inversión.
- Gobernanza del inventario.
- Reglas para la adquisición, uso y control de repuestos críticos.

Los **objetivos de gestión de activos** deben derivarse directamente de la estrategia corporativa.

Ejemplo en minería:

- Maximizar disponibilidad operacional del chancado y la molienda.
- Minimizar detenciones no programadas.
- Reducir riesgos de cadena de suministro.
- Optimizar costos logísticos y de almacenamiento.

ISO 55001 establece que los objetivos deben ser **medibles, alcanzables, relevantes y revisados periódicamente**, lo cual es esencial en la gestión de repuestos críticos.

6.3. Planificación del Sistema de Gestión de Activos

La planificación exige determinar:

- Riesgos operacionales asociados a fallas.
- Demandas de repuestos.
- Lead times reales vs contractuales.
- Necesidades presupuestarias.
- Estrategias de mantenimiento.
- Modelos cuantitativos de inventario.

ISO 55001 obliga a documentar cada una de estas decisiones, evitando improvisación o dependencias de experiencia individual.

6.4. Roles, responsabilidades y competencias (Nuevo subcapítulo)

Un elemento clave de ISO 55001 es que **la gestión de repuestos críticos no recae en un área aislada.**

Debe existir un modelo de gobernanza claro donde:

Mantenimiento

Define modos de falla, MTBF, MTTR, criticidad técnica.

Operaciones

Define impacto operacional, ventanas de mantenimiento, redundancias.

Abastecimiento

Gestiona proveedores, contratos, lead times y logística.

Finanzas

Evalúa presupuesto, costo del downtime, TCO y CAPEX/OPEX.

Planificación

Integra datos y asegura coherencia entre todos los departamentos.

La norma exige **competencias demostrables**: formación, experiencia y capacitación continua.

6.5. Información documentada y trazabilidad

ISO 55001 exige que toda decisión esté respaldada por **información documentada**:

- Registros de inventario
- Evaluaciones FMEA/FMEDA
- Matrices de criticidad
- Reportes de fallas
- Lead times históricos
- Órdenes de trabajo SAP PM
- Revisión de proveedores

Esto permite auditar decisiones, justificar inventarios críticos y asegurar que la organización opera bajo criterios objetivos.

6.6. Control operacional en repuestos críticos

ISO 55001 exige procesos formales para:

- Recepción
- Inspección
- Almacenamiento
- Rotación
- Control de humedad y contaminantes
- Trazabilidad SAP
- Protección contra deterioro
- Registro de uso y fallas

En minería, un repuesto crítico mal almacenado puede quedar inutilizable, incluso si la inversión fue elevada.

Por eso el control debe ser **estricto, documentado y auditable**.

6.7. Evaluación del desempeño (Nuevo subcapítulo)

La norma establece indicadores obligatorios para monitorear desempeño del SGA:

KPIs recomendados en minería:

- Disponibilidad física del chancador/molienda
- Porcentaje de órdenes detenidas por falta de repuestos
- Exactitud de inventario
- Cumplimiento de lead time
- Nivel de servicio de proveedores
- Número de fallas repetitivas por falta de stock
- MTBF real vs esperado
- Inventario muerto u obsoleto

Estos indicadores permiten evaluar si el inventario crítico está funcionando como corresponde.

6.8. Auditorías y revisión por la dirección (Nuevo subcapítulo clave)

ISO 55001 exige auditorías:

Auditoría interna

- Verifica cumplimiento del sistema
- Confirma trazabilidad
- Revisa criticidad y stock crítico
- identifica desviaciones

Auditoría externa

- Certifica cumplimiento de ISO 55001
- Valida metodología y gobernanza
- Evalúa eficacia del sistema

Revisión por la Dirección

Debe evaluar:

- Resultados
- Brechas
- Riesgos nuevos
- Cambios en la operación
- Requerimientos de inversión

Este ciclo asegura **mejora continua**, esencial en repuestos críticos.

6.9. Ciclo de vida de los activos y repuestos críticos (expansión profunda)

ISO 55001 establece que la gestión debe abarcar **todo el ciclo de vida**:

1. **Planificación y diseño del equipo**
2. **Selección del repuesto crítico**
3. **Adquisición**
4. **Almacenamiento**
5. **Uso y control**
6. **Reposición**
7. **Retiro y disposición final**

Este ciclo evita errores clásicos como:

- Sobre-stock por temor
- Sub-stock por recortes financieros
- Repuestos obsoletos
- Repuestos mal especificados

Incluso en etapas tempranas de ingeniería, la norma exige identificar repuestos de largo lead time.

6.10. Integración con ISO 22301 y continuidad operacional

ISO 55001 se complementa con ISO 22301:

- ISO 22301 identifica procesos críticos.
- ISO 55001 asegura que los repuestos para esos procesos estén disponibles.
- Juntos crean un sistema sólido para continuidad operacional.

En minería, esto significa:

- Repuestos de chancado y molienda **deben** estar asegurados.
- Repuestos con lead time largo **no pueden depender de compras reactivas**.
- La cadena logística debe ser parte del análisis de riesgo.

6.11. Aplicación real en minería chilena

ISO 55001 permite justificar decisiones que normalmente serían cuestionadas por finanzas, tales como:

- Mantener un piñón de chancador en bodega (inmovilizando capital),
- Comprar repuestos duplicados de bombas críticas,
- Mantener inventario estratégico para fallas catastróficas.

La norma respalda estas decisiones porque:

1. Protegen la continuidad operacional.
2. Reducen riesgos de alto impacto.
3. Mantienen la operación alineada con la estrategia global.
4. Evitan pérdidas multimillonarias por detenciones.

6.12. Cierre del capítulo

ISO 55001 transforma la gestión de repuestos críticos en una disciplina formal, auditable y estratégica.

Permite:

- Integrar datos, riesgo y confiabilidad.
- Justificar inventarios críticos ante finanzas.
- Fortalecer continuidad operacional.
- Reducir exposición a fallas catastróficas.

Con este estándar, los repuestos críticos dejan de ser un gasto e incertidumbre, para convertirse en un **pilar estructural del negocio minero**.

CAPÍTULO 7 – ISO 22301 Y CONTINUIDAD OPERATIVA

La continuidad operacional es uno de los pilares estratégicos de la minería. En plantas concentradoras, donde el flujo de mineral depende de la sincronía entre chancado, molienda, flotación y bombeo, una única falla en un componente crítico puede detener completamente la producción. En este contexto, el estándar **ISO 22301** proporciona un marco estructurado para asegurar la resiliencia operacional frente a eventos internos y externos que puedan comprometer el proceso.

7.1. Propósito del estándar ISO 22301

ISO 22301 tiene como principal objetivo establecer un **sistema de continuidad operativa** que permita:

- Identificar procesos esenciales.
- Evaluar su vulnerabilidad ante fallas, riesgos y eventos disruptivos.
- Implementar controles y planes preventivos.
- Asegurar que la operación pueda sostenerse ante contingencias.
- Recuperar el proceso en tiempos aceptables luego de un evento crítico.

A diferencia de ISO 55001, que se centra en gestión de activos, ISO 22301 se enfoca en **resiliencia y continuidad**, convirtiéndose en complemento directo del manejo de repuestos críticos.

7.2. Identificación de procesos críticos en minería

ISO 22301 exige la identificación de procesos esenciales cuya interrupción impacta directamente en la producción, seguridad o cumplimiento contractual.

En una planta concentradora típica, los procesos críticos incluyen:

- **Chancado primario:** inicio del flujo de mineral; su falla paraliza toda la planta.
- **Molienda SAG:** cuello de botella principal; pérdida de capacidad afecta recuperación metalúrgica.
- **Flotación:** etapa clave en la separación del mineral valioso.
- **Bombeo de pulpa (cyclone-feed):** regula granulometría; fallas generan inestabilidad en todo el circuito.
- **Sistemas de relaves:** esenciales para asegurar continuidad y cumplimiento ambiental.

ISO 22301 establece que cada uno de estos procesos debe tener un análisis de continuidad específico, incluyendo repuestos críticos asociados.

7.3. Evaluación de vulnerabilidades operacionales

El estándar obliga a realizar un mapeo de vulnerabilidades que considere:

- **Dependencias técnicas** entre equipos.
- **Riesgos logísticos** asociados a repuestos.
- **Impacto de fallas individuales.**
- **Probabilidad de ocurrencia.**
- **Condiciones externas** (clima, ubicación, proveedores).

Ejemplo realista:

- Una falla en el **piñón del chancador primario** detiene 100% la planta.
- Una falla en un **sello mecánico de bomba** altera el proceso, pero no lo detiene completamente.

Este análisis permite priorizar inventarios estratégicos y justificar su existencia ante auditorías y finanzas.

7.4. Resiliencia de la cadena de suministro en minería

El estándar ISO 22301 incorpora la resiliencia logística como componente esencial de la continuidad operativa.

En minería chilena, la cadena de suministro presenta riesgos estructurales:

7.4.1. Lead times prolongados e inciertos

- Repuestos críticos pueden demorar **90–180 días**.
- Fabricación “make to order” aumenta incertidumbre.

7.4.2. Dependencia de OEM internacionales

- Alemania, Finlandia, EE.UU., China.
- Vulnerabilidad por disponibilidad global.

7.4.3. Riesgos marítimos

- Retrasos en puertos.
- Pérdida de contenedores.
- Variabilidad en rutas navieras.

7.4.4. Baja disponibilidad nacional de repuestos complejos

- Distribuidores mantienen stock mínimo.
- Muchos críticos no se fabrican en Chile.

7.4.5. Riesgo de interrupciones globales

- Huelgas portuarias, eventos climáticos, conflictos internacionales.

Estos factores refuerzan la exigencia de mantener inventario crítico local.

7.5. Planes de continuidad operacional

ISO 22301 exige la definición de **planes formales** que determinen cómo asegurar la continuidad del proceso ante interrupciones.

Estos planes deben incluir:

- Inventarios críticos mínimos garantizados.
- Estrategias de respuesta ante fallas mayores.
- Procedimientos para activar recursos alternativos.
- Planes de recuperación rápida del proceso.
- Identificación de proveedores estratégicos con disponibilidad garantizada.

Los planes deben actualizarse periódicamente, considerando cambios en operación, proveedores y condiciones logísticas.

7.6. Análisis de escenarios y estimación de impacto

El análisis de escenarios evalúa distintos tipos de eventos disruptivos y su impacto en continuidad operacional.

Para minería, los escenarios incluyen:

- Falla inesperada de componente crítico.
- Atrasos en importaciones.
- Fallas repetitivas de equipos auxiliares.
- Indisponibilidad temporal de proveedores.
- Cambios en calidad del mineral que aumentan desgaste.

Los resultados muestran impactos como:

- Reducción de producción.
- Aumento del costo por tonelada tratada.
- Pérdida de recuperación metalúrgica.
- Incrementos en costos logísticos.
- Riesgos de incumplimiento contractual.

Este análisis es clave para justificar inventarios estratégicos.

7.7. Capacidad de recuperación (Recovery Capability)

La capacidad de recuperación es la habilidad de la organización para volver a un estado normal operativo después de una interrupción.

En minería, depende de:

- Tiempo para reemplazar el componente fallado.
- Disponibilidad inmediata del repuesto crítico.
- Recursos técnicos (grúas, izaje, especialistas).
- Alineación con planificación de mantenimiento.
- Acceso a rutas logísticas alternas.

Si un repuesto crítico no está disponible, la capacidad de recuperación se reduce a cero, generando pérdidas significativas.

7.8. Integración entre ISO 22301 e ISO 55001

Ambas normas se complementan:

ISO 55001	ISO 22301
Gestión de activos	Continuidad operacional
Decisiones basadas en evidencia	Evaluación de vulnerabilidades
Roles y gobernanza	Planes de respuesta
Ciclo de vida del activo	Recuperación ante fallas
Trazabilidad documental	Resiliencia logística

Cuando se aplican juntas:

- La empresa puede justificar inventarios críticos.
- La continuidad operacional se convierte en variable estratégica.
- La cadena de suministro se integra al marco de riesgo corporativo.

7.9. Aplicación práctica en minería chilena

Las operaciones mineras chilenas aplican ISO 22301 para:

- Definir inventarios críticos mínimos.
- Establecer acuerdos de disponibilidad con OEM.
- Asegurar repuestos para fallas de alto impacto.
- Evaluar riesgos logísticos mediante datos históricos.
- Desarrollar protocolos de recuperación ante falla catastrófica.

Ejemplo concreto:

- Si el piñón del chancador tiene un lead time real de **120–150 días**, el plan de continuidad exige mantener al menos una unidad en bodega.
- Si un sello mecánico tiene lead time de **5–15 días**, se puede manejar inventario dinámico con stock de seguridad.

7.10. Cierre del capítulo

ISO 22301 aporta un enfoque que trasciende la gestión tradicional de inventarios.
Su valor radica en:

- Convertir el riesgo operativo en una variable estratégica.

- Integrar continuidad, resiliencia y logística.
- Justificar decisiones financieras de alto impacto.
- Proteger la operación frente a eventos disruptivos.

Para minería, donde la detención de equipos críticos puede costar millones por día, ISO 22301 se convierte en una herramienta indispensable.

CAPÍTULO 8 – CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO EN LA MINERÍA

La confiabilidad y el mantenimiento constituyen dos pilares esenciales para asegurar la continuidad operacional en minería. En una planta concentradora, donde los equipos funcionan bajo condiciones extremas y altamente exigentes, el desempeño confiable de los activos depende de un sistema de mantenimiento maduro, respaldado por análisis técnico, datos históricos y decisiones basadas en riesgo. La confiabilidad no solo influye en la disponibilidad física de los activos, sino también en la gestión estratégica de repuestos críticos.

8.1. Fundamentos de la confiabilidad operativa

La confiabilidad se define como la probabilidad de que un activo realice su función sin fallas durante un periodo de tiempo específico bajo condiciones definidas. En minería, esta probabilidad está influida por factores como:

- Condiciones ambientales (altitud, temperatura, abrasión).
- Variabilidad del mineral procesado.
- Cargas mecánicas y vibraciones.
- Calidad del mantenimiento ejecutado.
- Diseño del componente.
- Modos de operación del equipo.

La confiabilidad operacional sirve como base para predecir fallas, definir intervalos de mantenimiento y determinar repuestos críticos necesarios para sostener operaciones continuas.

8.2. Indicadores clave: MTBF y MTTR

Los indicadores más utilizados para evaluar confiabilidad son:

8.2.1. MTBF: Mean Time Between Failures

Representa el tiempo promedio entre fallas.

Un MTBF elevado indica comportamiento confiable y estable; uno bajo señala activos con fallas recurrentes.

Ejemplos realistas en plantas concentradoras:

- **Piñón de chancador primario:** MTBF 30.000–40.000 h
- **Sellos mecánicos de bomba cyclone-feed:** MTBF 4.000–6.000 h
- **Motores eléctricos de bombas:** MTBF 15.000–20.000 h

El MTBF influye directamente en la cantidad de repuestos que deben mantenerse disponibles.

8.2.2. MTTR: Mean Time To Repair

Representa el tiempo promedio requerido para completar una reparación.

Ejemplos:

- **Piñón del chancador:** 22–30 h
- **Sello mecánico:** 3–5 h

La combinación **MTBF + MTTR** permite determinar la **disponibilidad** de un activo:

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

En minería, mantener alta disponibilidad es obligatorio para cumplir metas de producción.

Sin repuestos críticos, el MTTR se dispara, disminuyendo disponibilidad y aumentando pérdidas operacionales.

8.3. Curvas de falla y distribución Weibull

La confiabilidad se modela a través de curvas de falla, siendo la distribución **Weibull** la más utilizada.

Permite identificar:

- **Fallas tempranas ($\beta < 1$)**
- **Fallas aleatorias ($\beta = 1$)**
- **Fallas por desgaste ($\beta > 1$)**

Ejemplo aplicado:

- Un sello mecánico opera con $\beta \approx 2-3$ (desgaste).
- Un piñón de chancador opera con $\beta \approx 1.3-1.5$ (fallas aleatorias con tendencia a desgaste).

Interpretar la forma de la curva permite anticipar cuándo un repuesto será necesario y definir inventario.

8.4. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El **RCM** es una metodología enfocada en asegurar que los activos continúen cumpliendo sus funciones.

En minería, el RCM permite:

- Identificar modos de falla relevantes.
- Seleccionar estrategias de mantenimiento óptimas.
- Determinar repuestos críticos necesarios para mitigar fallas.

El proceso RCM incluye:

1. Selección del activo crítico.
2. Identificación de funciones.
3. Modos de falla.
4. Efectos de la falla.
5. Consecuencias.
6. Estrategias de mitigación.
7. Necesidades de inventario crítico.

El RCM fortalece la precisión en la identificación de repuestos de alto impacto.

8.5. Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA/FMEDA)

8.5.1. FMEA tradicional

Permite evaluar severidad, ocurrencia y detectabilidad para priorizar modos de falla.

8.5.2. FMEDA (versión avanzada)

Incluye:

- Probabilidades cuantitativas
- Diagnóstico integrado
- Cobertura de monitoreo predictivo
- Evaluación de falla oculta

Es especialmente útil para:

- Sellos
- Bombas
- Equipos con instrumentación
- Sistemas hidráulicos
- PLC

Ambas metodologías justifican la existencia de repuestos críticos en bodega.

8.6. Confiabilidad basada en condición (CBM)

El mantenimiento basado en condición utiliza monitoreo en tiempo real para detectar patrones de falla:

- Vibraciones
- Sonido ultrasónico
- Temperatura
- Presión
- Análisis de aceite
- Desgaste metálico

En minería 2025, el CBM permite:

- Reducir repuestos innecesarios
- Comprar solo cuando el desgaste real lo amerita
- Disminuir fallas repentinas
- Aumentar precisión en inventario crítico

8.7. Estrategias de mantenimiento aplicadas en minería

8.7.1. Mantenimiento preventivo

Realizado en intervalos regulares; ideal para repuestos de desgaste.

8.7.2. Mantenimiento predictivo

Respaldado por datos y monitoreo.

8.7.3. Mantenimiento correctivo

Aplicado cuando la falla ya ocurrió; muy costoso en equipos primarios.

8.7.4. Mantenimiento proactivo

Incluye mejoras en diseño y operación para eliminar causas raíz.

8.8. Relación entre confiabilidad e inventario crítico

La confiabilidad determina:

- Qué repuestos deben mantenerse disponibles.
- Cantidad necesaria para cubrir eventos.
- Frecuencia de compra.
- Nivel de stock de seguridad.

Ejemplos:

- Si el MTBF del sello cyclone-feed es de 5.000 h y la planta opera 24/7, se esperan 1–3 fallas anuales → se requiere stock.
- Si el MTBF del piñón del chancador es de 35.000 h y su MTTR es alto, aunque la probabilidad de falla sea baja → se requiere inventario asegurado.

8.9. Indicadores avanzados para minería 2025 (nuevo)

Para un sistema maduro se deben incorporar KPIs como:

- Confiabilidad operacional del circuito (chancado → molienda → flotación).
- Variabilidad del MTBF entre turnos.
- Probabilidad ajustada de falla por condiciones de mineral.

- Cumplimiento de PM y backlog.
- Exactitud de inventario crítico.
- Lead time real vs contractual.
- Tiempo de exposición a riesgo (horas sin repuesto crítico disponible).

8.10. Minería 4.0 aplicada a confiabilidad (nuevo)

Modernizar la gestión de repuestos críticos exige integrar tecnologías:

- **Sistemas IIoT (Internet Industrial de las Cosas)**
- **Machine Learning para predicción de falla**
- **Digital Twins de equipos**
- **Sistemas SCADA avanzados**
- **Plataformas APM (Asset Performance Management)**

Estas herramientas permiten:

- Detectar fallas tempranas
- Predecir reemplazos
- Ajustar inventario según desgaste real
- Reducir compras urgentes
- Mejorar precisión en criticidad

8.11. Cierre del capítulo

La confiabilidad y el mantenimiento representan la base técnica para gestionar repuestos críticos.

Un sistema minero eficiente requiere:

- Datos fiables
- Modelos predictivos
- Evaluaciones FMEA/FMEDA
- Indicadores MTBF/MTTR actualizados
- Integración con mantenimiento y logística
- Inventario crítico alineado al riesgo operacional

Sin un modelo sólido de confiabilidad, cualquier decisión de inventario carece de fundamento técnico.

CAPÍTULO 9 – MODELOS CUANTITATIVOS DE INVENTARIO

La gestión cuantitativa del inventario constituye el pilar analítico que permite fundamentar decisiones sobre repuestos críticos. A diferencia de métodos empíricos o basados en experiencia, los modelos matemáticos permiten evaluar la demanda, el riesgo, los costos asociados y el efecto de la variabilidad logística. En minería, estos modelos deben adaptarse a condiciones particulares: lead times prolongados, dependencia de OEM internacionales, fallas de alto impacto y detenciones extremadamente costosas.

Este capítulo integra fórmulas, criterios avanzados, ejemplos aplicados y lineamientos que permiten determinar niveles óptimos de inventario y justificar los repuestos críticos desde un enfoque técnico y financiero.

9.1. Modelo EOQ (Economic Order Quantity)

El modelo EOQ define la cantidad óptima a ordenar para minimizar el costo total, combinando:

- Costo de ordenar (S)
- Costo de almacenamiento (H)
- Demanda anual (D)

La fórmula clásica es:

$$EOQ = \sqrt{2DS / H}$$

Sin embargo, **EOQ estándar rara vez se aplica de forma directa a repuestos críticos**, porque:

1. La demanda suele ser intermitente o irregular.
2. Los costos de detención exceden cualquier costo de almacenamiento.
3. El lead times son largos y variables.
4. El riesgo operacional tiene mayor peso que el costo financiero.

Por eso se utiliza EOQ modificado o modelos híbridos.

9.1.1. EOQ Modificado para minería (nuevo y muy importante)

Cuando los repuestos tienen:

- demanda intermitente,
- lead times extensos,
- y alto impacto operacional,

se usa **EOQ modificado**, donde se incorpora:

- nivel de servicio requerido (SL),
- costo de quiebre de stock (Cu),
- costo de sobreabastecimiento (Co).

El EOQ modificado se expresa como:

$$EOQ = \sqrt{2D(S + Cu) / H}^*$$

Si el costo de quiebre (downtime) es extremadamente alto, el modelo recomienda mayores cantidades que EOQ clásico.

9.2. Punto de pedido (ROP: Reorder Point)

El **ROP** indica cuándo iniciar una orden antes de que se agote el inventario.

La fórmula básica es:

$$ROP = \text{Lead Time} \times \text{Demanda diaria}$$

Pero en minería, esta simplificación es insuficiente.

9.2.1. ROP ajustado por variabilidad del lead time

Cuando existe incertidumbre, la fórmula se convierte en:

$$ROP = (d \times LT) + SS$$

Donde:

- **d** = demanda diaria
- **LT** = lead time promedio o máximo
- **SS** = stock de seguridad

La selección entre LT promedio o LT máximo depende del nivel de criticidad:

- **Críticos catastróficos:** LT máximo
- **Esenciales:** LT promedio + desviación estándar
- **No críticos:** LT promedio

9.3. Stock de seguridad (SS)

El stock de seguridad protege contra:

- variaciones de consumo,
- atrasos de proveedor,
- fallas inesperadas,
- riesgos logísticos,
- variabilidad marítima,
- y lead times inestables.

La fórmula con variabilidad conjunta:

$$SS = Z \times \sqrt{(LT \times \sigma d^2) + (d^2 \times \sigma LT^2)}$$

Donde:

- **Z** = factor del nivel de servicio
- **σd** = desviación estándar de la demanda diaria
- **σLT** = desviación estándar del lead time

En minería:

- Repuestos catastróficos → **Z = 2.33** (99% servicio)
- Repuestos esenciales → **Z = 1.64** (95%)
- Repuestos no críticos → **Z = 1.28** (90%)

9.4. Modelos probabilísticos aplicados en minería (nuevo subcapítulo técnico)

Los repuestos críticos tienen demanda **intermitente**, por lo que se usan modelos probabilísticos:

9.4.1. Distribución Poisson

Ideal para fallas infrecuentes.

9.4.2. Distribución Binomial Negativa

Representa fallas en activos con desgaste acelerado.

9.4.3. Aproximación normal

Para repuestos de alta rotación (sellos, empaquetaduras).

Estos modelos permiten estimar la probabilidad de quiebre de stock.

9.5. Análisis de riesgo financiero del inventario (nuevo)

El inventario crítico tiene impacto financiero, pero el costo principal no es almacenarlo... sino **no tenerlo**.

Se evalúan:

- Costo de capital
- Costos logísticos
- Costos de no disponibilidad
- Costos de detención (downtime)
- Costo de compra urgente (aéreo)

Costo de no disponibilidad (CND):

$CND = (Producción\ perdida \times Precio\ del\ metal \times Recuperación) + Costos\ indirectos$

Ejemplo:

- Planta de 150 kTPD
- Pérdida de 2 horas
- Downtime por chancador primario → USD 150.000/h
- Repuesto crítico no disponible → impacto > USD 300.000 en solo 2 h

Esto justifica mantener stock estratégico.

9.6. Sensibilidad del inventario frente al lead time (nuevo subcapítulo clave)

En minería, el parámetro más crítico es el **lead time real**.

Modelos de sensibilidad comparan tres escenarios:

- **LT promedio:** baja protección
- **LT máximo histórico:** protección robusta
- **LT contractual:** generalmente incorrecto

Impacto:

- Si LT aumenta 20%, el ROP aumenta proporcionalmente.
- Si LT se duplica, SS aumenta exponencialmente.

Por eso se recomienda utilizar **LT máximo** para repuestos críticos.

9.7. Evaluación costo-beneficio del inventario crítico (nuevo)

El inventario crítico debe evaluarse según:

- Valor del repuesto
- Probabilidad anual de falla
- Impacto de downtime
- Costo financiero
- Lead time real
- Nivel de redundancia

Modelo:

$$\text{Beneficio neto} = (\text{Prob_falla} \times \text{Costo_downtime_ahorrado}) - \text{Costo_capital}$$

Si el resultado es positivo, el inventario es justificable.

En minería, casi siempre es positivo para:

- Piñones de chancador
- Ejes de bombas
- Motores críticos
- Variadores
- Rodamientos especiales

9.8. Modelos avanzados para minería 2025 (nuevo y moderno)

9.8.1. Monte Carlo

Simula miles de escenarios:

- fallas inesperadas
- atrasos logísticos
- variabilidad de consumo
- cambios en mineral
- variaciones en MTBF

9.8.2. Digital Twins

Permite evaluar desgaste real del componente.

9.8.3. Machine Learning

Predice demanda futura con base en:

- vibraciones
- cargas
- calidad del mineral
- horas operadas
- historial SAP PM

9.9. Integración del modelo cuantitativo con el sistema de criticidad

El modelo final integra:

- clasificación crítica (de FMEA/RCM),
- lead time real,
- MTBF/MTTR,
- impacto financiero,
- variabilidad de demanda,
- probabilidad de falla.

Resultado:

- Política de inventario crítica bien definida
- Repuestos catastróficos → inventario asegurado
- Repuestos esenciales → inventario dinámico
- Repuestos no críticos → bajo stock

9.10. Cierre del capítulo

Este capítulo entrega una estructura sólida para determinar niveles de inventario utilizando análisis cuantitativo, modelos matemáticos y criterios de riesgo.

En minería:

- Los modelos tradicionales deben adaptarse.
- El costo principal es la detención, no el inventario.
- El lead time es el parámetro más crítico.
- Los repuestos críticos deben justificarse matemáticamente.

Con este enfoque, la organización puede demostrar con evidencia la necesidad de mantener inventarios estratégicos, alineándose con ISO 55001 y ISO 22301.

CAPÍTULO 10 – RELACIÓN ENTRE INVENTARIO Y RIESGO OPERATIVO

La gestión de inventario en minería no es un ejercicio contable. Es una decisión estratégica que busca controlar la exposición al riesgo operativo, especialmente frente a fallas de activos críticos. En una planta concentradora, donde la detención total o parcial del proceso puede generar pérdidas económicas significativas, el inventario de repuestos críticos se convierte en un elemento esencial de mitigación de riesgo. Este capítulo integra conceptos de riesgo, continuidad, confiabilidad y análisis económico para establecer cómo y por qué el inventario influye directamente en la seguridad operativa del negocio minero.

10.1. Concepto de riesgo operativo

El riesgo operativo se define como la probabilidad de que un evento inesperado afecte el cumplimiento de los objetivos productivos.

En minería incluye:

- Fallas de equipos críticos.
- Atoros, derrames o eventos metalúrgicos.
- Falta de repuestos clave.
- Atrasos del proveedor.
- Problemas logísticos.
- Errores en ejecución de mantenimiento.

El inventario crítico reduce el riesgo operativo evitando detenciones prolongadas.

10.1.1. Riesgo técnico vs riesgo logístico

Riesgo técnico:

Asociado al comportamiento del activo (MTBF, MTTR, modos de falla).

Riesgo logístico:

Asociado al lead time, disponibilidad de proveedor, transporte y aduana.

Es común que la minería enfoque la gestión en el riesgo técnico, pero la experiencia demuestra que el **riesgo logístico** es igual o más determinante que la confiabilidad del activo.

10.2. Impacto operacional de una falla sin repuesto crítico

Cuando un repuesto crítico no está disponible:

1. El equipo queda fuera de servicio.
2. La operación entra en detención parcial o total.
3. La cadena de procesos se altera.
4. Se genera pérdida directa de producción.
5. Se afectan KPIs metalúrgicos.
6. Se incrementan costos correctivos, logísticos y laborales.

Ejemplo típico:

- Falla del piñón del chancador primario → detención completa del flujo.
- No disponer del repuesto → horas o días de detención.
- Impacto económico: USD 150.000–250.000 por hora detenida.

Un solo evento puede justificar la mantención de inventarios estratégicos por años.

10.3. Clasificación del riesgo aplicado a repuestos críticos

10.3.1. Riesgo catastrófico

Impacto extremo, detención total, pérdidas millonarias.

Ejemplo: falla piñón, motor SAG, variador principal.

10.3.2. Riesgo alto

Afecta producción parcial y requiere intervención inmediata.

Ejemplo: sello de bomba cyclone-feed.

10.3.3. Riesgo medio

Afecta eficiencia o potencia del proceso.

Ejemplo: rodamientos auxiliares.

10.3.4. Riesgo bajo

Impacto mínimo.

Ejemplo: elementos menores no críticos.

Esta clasificación orienta la política de inventario.

10.4. Modelos de probabilidad de falla y su relación con inventario

Un buen sistema de inventario crítico debe integrar:

- MTBF
- Variabilidad de carga
- Distribución de fallas (Weibull)
- Ambiente operacional
- Modes de falla críticos

Ejemplo práctico: sello mecánico

- MTBF: 5.000 h
- Vida útil depende de densidad de pulpa
- Falla detiene parte del proceso

Resultado → Inventario esencial con stock de seguridad.

Ejemplo práctico: piñón de chancador

- MTBF: 35.000 h
- Falla es catastrófica
- Lead time > 120 días

Resultado → Inventario crítico obligatorio.

10.5. Evaluación del riesgo logístico (nuevo subcapítulo clave)

En minería, el principal riesgo no es la falla...
es **no tener el repuesto cuando ocurre**.

Se evalúan:

- Lead time contractual vs real
- Disponibilidad de proveedores alternativos
- Variabilidad marítima
- Congestión portuaria
- Riesgos de importación
- Contingencias globales

Ejemplo realista:

- Lead time contractual: 90 días
- Lead time real promedio: 120 días
- Lead time máximo histórico: 155 días

Esto determina el ROP, SS y necesidad de inventario asegurado.

10.6. Matriz de riesgo para inventarios críticos

Una matriz robusta considera dos ejes:

Eje 1: Probabilidad de falla

Derivada de MTBF, ambiente y modos de falla.

Eje 2: Consecuencia

Derivada de:

- Producción perdida
- Costos por hora detenida

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME A LA NORMA ISO 55000

- Impacto metalúrgico
- Seguridad
- Medio ambiente

El resultado:

- Zona roja → inventario crítico asegurado
- Zona amarilla → inventario dinámico
- Zona verde → inventario mínimo o bajo demanda

10.7. Impacto financiero del riesgo operacional

La evaluación financiera considera:

- Costo del repuesto
- Costo del downtime
- Probabilidad de falla
- Costo logístico
- Costo de capital
- TCO (Total Cost of Ownership)

Fórmula general de impacto:

$$\text{Impacto esperado} = \text{Prob_falla} \times \text{Costo_downtime}$$

Ejemplo:

- Probabilidad anual = 3%
- Costo downtime = USD 200.000/h
- Tiempo estimado = 12 h
- Impacto = $0,03 \times (200.000 \times 12)$
= **USD 72.000 anuales**

Si el repuesto cuesta USD 30.000, su stock está más que justificado.

10.8. Inventario crítico como mitigación de riesgo (subcapítulo ampliado)

El inventario crítico se convierte en:

- Póliza de seguro operacional
- Reducción de vulnerabilidad logística
- Disminución de detenciones inesperadas
- Garantía de continuidad ISO 22301
- Elemento central en gobernanza ISO 55001

- Estabilizador de costos y producción

Sin inventario crítico, incluso con buen mantenimiento, la operación sigue expuesta.

10.9. Estrategias para reducir riesgo mediante inventario

10.9.1. Inventario asegurado

Repuestos con alto impacto y lead time largo.

Ejemplo: piñón, eje, motor SAG.

10.9.2. Inventario condicionado

Repuestos de alta rotación y mediano riesgo.

Ejemplo: sellos, rodamientos.

10.9.3. Acuerdos de disponibilidad OEM

El proveedor garantiza stock estratégico mínimo.

10.9.4. Inventario en consignación

Reduce costo financiero.

10.9.5. Inventario basado en condición (CBM)

Solo se compra en función del desgaste real.

10.10. Integración del inventario como parte del sistema de continuidad operacional

El inventario crítico se integra con:

- ISO 22301 (continuidad)
- ISO 55001 (gestión de activos)
- RCM/RCM2 (confiabilidad)
- SAP PM (gestión de mantenimiento)
- Logística avanzada (EAM, IIoT)

Esto crea un **sistema completo**, donde:

- La falla se anticipa
- El repuesto está disponible

- El riesgo disminuye
- La operación se estabiliza

10.11. Cierre del capítulo

El inventario crítico es un mecanismo directo de control del riesgo operativo. Integrar modelos de confiabilidad, análisis cuantitativo, evaluación de proveedores, riesgo logístico y continuidad operacional permite construir un sistema robusto que protege la operación minera ante fallas de alto impacto.

Este capítulo deja claro que gestionar inventario no es un gasto: es una inversión estratégica que garantiza continuidad, eficiencia y valor para la organización.

CAPÍTULO 11 – GESTIÓN INTEGRADA DE ACTIVOS Y REPUESTOS CRÍTICOS

La gestión moderna de activos en minería exige un enfoque integrado que combine normativas internacionales, estrategias operacionales, análisis cuantitativos y prácticas de continuidad operacional. Este capítulo articula todos estos elementos para construir un **sistema unificado**, robusto y alineado con los estándares ISO 55000, ISO 55001 y ISO 22301.

El objetivo es asegurar que los repuestos críticos estén disponibles cuando sean requeridos, protegiendo la continuidad del proceso y maximizando el valor del negocio minero.

11.1. Alineación estratégica entre gestión de activos y repuestos críticos

La gestión de activos (Asset Management) establece la relación entre:

- los objetivos corporativos,
- el desempeño requerido de los activos,
- la criticidad de los componentes,
- y la política de inventario.

Un sistema integrado permite:

- asignar recursos correctamente,
- priorizar decisiones basadas en riesgo,
- justificar inventarios críticos,

- y sostener la continuidad operativa.

En minería, esta alineación es obligatoria debido al alto costo por hora detenida y a la dependencia de activos de gran escala.

11.2. Componentes del sistema integrado de gestión de activos

La integración requiere cohesión entre los siguientes elementos:

1. Normativa ISO 55001

Define roles, procesos, trazabilidad y gobernanza.

2. Continuidad operacional ISO 22301

Define vulnerabilidades, escenarios y resiliencia.

3. Confiabilidad y mantenimiento (RCM, CBM, FMEA/FMEDA)

Definen modos de falla y criticidad técnica.

4. Modelos cuantitativos (EOQ, ROP, SS)

Definen niveles óptimos y decisiones basadas en riesgo.

5. Cadena logística y proveedores

Definen lead time real, variabilidad e incertidumbre.

6. Información documentada y SAP PM

Controlan inventario, fallas, órdenes y trazabilidad.

El sistema solo funciona si estos elementos trabajan coordinadamente.

11.3. Gobernanza del sistema de gestión de repuestos críticos

La gobernanza define cómo se toman decisiones y quién es responsable de cada componente.

Para minería, el modelo recomendado incluye:

Mantenimiento

- Define modos de falla.
- Registra MTBF y MTTR.
- Identifica repuestos críticos técnicos.

Operaciones

- Evalúa impacto operacional.
- Determina ventanas de mantenimiento.
- Define prioridades productivas.

Abastecimiento

- Evalúa proveedores.
- Controla lead times reales.
- Negocia acuerdos de disponibilidad.

Logística

- Garantiza trazabilidad, almacenamiento y control ambiental.
- Asegura recepción conforme y control de obsolescencia.

Finanzas

- Evalúa TCO, CAPEX/OPEX, impacto financiero del downtime.
- Justifica inventario crítico desde análisis costo-beneficio.

Gerencia de Activos

- Integra todas las áreas.
- Asegura cumplimiento ISO 55001.
- Valida criticidad final y políticas de inventario.

Este modelo evita arbitrariedad, sesgo y decisiones aisladas.

11.4. Integración de metodologías: del análisis técnico a la decisión de inventario

La integración metodológica sigue un flujo lógico:

1. **Identificación de funciones del equipo**
2. **Modos de falla (FMEA/FMEDA)**
3. **Evaluación probabilística (Weibull, MTBF)**
4. **Clasificación de criticidad**
5. **Evaluación de impacto y continuidad (ISO 22301)**
6. **Cálculo de ROP, SS y EOQ modificado**
7. **Revisión de lead time real**
8. **Validación financiera**
9. **Definición de política de inventario**
10. **Registro en SAP y auditoría ISO 55001**

Esto crea un sistema matemático, documental y auditable.

11.5. Integración digital del sistema

La minería moderna utiliza sistemas avanzados que integran datos en tiempo real, análisis histórico y predicción.

11.5.1. SAP PM (núcleo de gestión)

- Ordenes de trabajo
- Listas de materiales (BOM)
- Historias de falla
- MTBF/MTTR
- Inventario crítico
- Lead time registrado

11.5.2. APM (Asset Performance Management)

Sistema que cruza:

- vibraciones,
- cargas,
- desgaste real,
- datos metalúrgicos,
- consumos históricos.

11.5.3. SCADA + IIoT

Sensores que permiten ver condición real:

- bombas,
- molinos,
- chancadores,
- motores,
- sellos.

11.5.4. Digital Twins

Simulan desgaste y predicen fallas futuras.

Todo esto permite ajustar inventario crítico de manera precisa.

11.6. Marco decisonal integrado para repuestos críticos

Este marco combina:

- **Confiabilidad** (probabilidad de falla)
- **Impacto** (pérdida productiva)
- **Logística** (lead time real)
- **Finanzas** (downtime vs CAPEX/OPEX)
- **Normativas** (ISO 55001 + ISO 22301)

Las decisiones finales se basan en criterios ponderados:

Criterio	Peso recomendado
Impacto operacional	35%
Lead time real	25%
MTBF/MTTR	15%
Riesgo logístico	15%
TCO / análisis financiero	10%

Con esto se genera una **criticidad integrada**, que define política de inventario.

11.7. Flujo documental exigido por ISO 55001

ISO 55001 exige evidencia de:

- Matriz de criticidad
- FMEA/FMEDA
- Evaluaciones de proveedores
- Lead times históricos
- Inventario crítico definido
- Revisión anual
- Auditoría interna
- Revisión por la Dirección

Cada repuesto crítico debe contar con:

- **Ficha de criticidad**
- **Justificación técnica**
- **Justificación financiera**
- **Registro SAP**
- **Historial de fallas**

Esto solidifica trazabilidad y gobernanza.

11.8. Implementación del sistema en minería chilena

La aplicación práctica incluye:

- Workshops de criticidad con mantenimiento, operaciones y abastecimiento.
- Integración con SAP y revisión de BOM.
- Revisión de lead times reales con proveedores.
- Creación de inventarios críticos asegurados.
- Ajuste de ROP y SS según la demanda real.
- Auditorías trimestrales internas.
- Validación financiera anual.

Este proceso es estándar en operaciones de clase mundial (Codelco, Antofagasta Minerals, BHP).

11.9. Beneficios directos del sistema integrado

El sistema genera:

- Disminución de downtime no programado.
- Mayor confiabilidad operacional.
- Mejor toma de decisiones basada en datos.
- Reducción de compras urgentes.
- Mayor predictibilidad en presupuesto.
- Protección de la continuidad operacional.
- Alineación con auditorías ISO.

11.10. Cierre del capítulo

La gestión integrada de activos y repuestos críticos convierte un inventario tradicional en un **sistema estratégico**, capaz de reducir riesgos, estabilizar producción y proteger la continuidad operacional.

Su valor radica en la integración multidisciplinaria, la gobernanza, la trazabilidad y la aplicación concreta de normativas internacionales.

CAPÍTULO 12 – ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE REPUESTOS

El análisis comparativo permite evaluar dos repuestos distintos bajo un enfoque común de criticidad, confiabilidad, logística, riesgo operativo e impacto económico. En este capítulo se analizan dos repuestos representativos del proceso de una planta concentradora:

1. **Piñón del Chancador Primario**
2. **Sello Mecánico de Bomba Cyclone-Feed**

Ambos son relevantes; sin embargo, su impacto, criticidad, lead time y efecto operacional son completamente diferentes.

Este contraste permite mostrar cómo funciona la metodología completa de la tesina.

12.1. Descripción de los repuestos seleccionados

12.1.1. Piñón del Chancador Primario

- Componente de alto costo y alta especialización.
- Fabricación de precisión (acero forjado, mecanizado de alta exactitud).
- OEM extranjero (Finlandia/Alemania).
- Función: transmitir torque desde el motor al eje del chancador.
- Falla → detención total de la planta.

12.1.2. Sello Mecánico de Bomba Cyclone-Feed

- Componente de desgaste regular.
- Fabricación disponible en Chile por distribuidores autorizados.
- Función: evitar fuga de pulpa en bombas de alimentación a ciclones.
- Falla → afecta estabilidad, pero no detiene completamente la planta.

12.2. Parámetros comparativos críticos (tabla central del capítulo)

A continuación, se presenta una tabla comparativa con valores realistas típicos de operación:

Parámetro	Piñón Chancador Primario	Sello Mecánico Bomba Cyclone-Feed
MTBF	30.000 – 40.000 h	4.000 – 6.000 h
MTTR	22 – 30 h	3 – 5 h
Lead Time contractual	90 días	5 – 10 días
Lead Time real	120 – 150 días	7 – 14 días
Costo aproximado	USD 80.000 – 150.000	USD 1.500 – 3.000
Impacto por falla	Catastrófico (detiene planta)	Medio (desestabiliza proceso)
Disponibilidad local	No	Sí
Probabilidad anual de falla	2–4%	2–3 reemplazos/año
Categoría de criticidad	Crítico Catastrófico	Crítico Esencial (de desgaste)

Esta tabla permite visualizar la enorme diferencia en criticidad y logística entre los dos repuestos.

12.3. Evaluación cuantitativa del impacto económico

El análisis incorpora el costo de detención, la probabilidad de falla y los tiempos de reposición.

12.3.1. Piñón del Chancador Primario

Cálculo de costo esperado anual:

- Probabilidad de falla: 3%
- Downtime por cambio: 24 h
- Costo/hora detenida: USD 150.000

Impacto esperado = $0,03 \times (150.000 \times 24)$
≈ USD 108.000/año

Mantenerlo en bodega cuesta menos que una sola detención.

12.3.2. Sello Mecánico Bomba Cyclone-Feed

- Frecuencia: 2–3 veces al año
- Downtime promedio: 4 h
- Costo/hora detenida parcial: USD 10.000
- Impacto promedio por evento: $4 \times 10.000 = \text{USD } 40.000$

Impacto anual:
USD 80.000 – 120.000

Costo del repuesto es bajo → mantener stock es obligatorio.

12.4. Análisis de criticidad integrada

Se evalúan ambos repuestos bajo:

- Confiabilidad (MTBF/MTTR)
- Impacto operacional
- Lead time real
- Trazabilidad ISO 55001
- Continuidad operacional ISO 22301
- Modelos cuantitativos (ROP, SS)

Resultados:

Piñón del Chancador Primario

- Consecuencia máxima (zona roja)
- Lead time extremadamente largo
- Probabilidad baja, pero impacto catastrófico
→ **Inventario crítico asegurado** (1 unidad mínimo)

Sello Mecánico

- Demanda recurrente
- Costo bajo
- Lead time corto
→ **Inventario esencial con rotación alta** (3–5 unidades)

12.5. Matriz comparativa de riesgos

Criterio	Piñón Chancador	Sello Mecánico
Riesgo técnico	Alto	Medio
Riesgo logístico	Muy alto	Bajo
Riesgo operativo	Catastrófico	Medio
Riesgo financiero	Muy alto	Bajo
Riesgo de continuidad	Crítico absoluto	Crítico esencial
Recomendación	Inventario asegurado	Stock rotativo permanente

12.6. Aplicación de modelos cuantitativos

12.6.1. ROP Piñón Chancador

ROP = demanda anual $\times$ lead time real

Demanda anual = 0,03 unidades

Lead time real: 120 días

ROP $\approx$ 0,1 unidades → redondeo operacional = **1 unidad mínima**

12.6.2. ROP Sello Mecánico

Demanda anual: 3 unidades

Lead time real: 10 días

$ROP = 3/365 \times 10 \approx 0,08$ unidades

→ ROP práctico = **1 unidad**

12.6.3. Stock de seguridad recomendado

- Piñón: no corresponde (stock asegurado = 1).
- Sello: 2–3 unidades adicionales.

12.7. Análisis de sensibilidad

Caso 1: Lead time del piñón aumentó a 180 días

→ Stock asegurado sigue siendo 1

→ ROP no cambia

→ Aumenta riesgo logístico → mayor urgencia en auditorías y contratos OEM

Caso 2: Bomba cyclone-feed trabaja con pulpa más abrasiva

→ MTBF baja de 5.000 h a 3.500 h

→ Aumenta demanda anual de sellos

→ ROP pasa a 2 unidades

→ Stock de seguridad pasa a 3–4 unidades

12.8. Resultados generales del análisis comparativo

1. **Ambos repuestos son críticos**, pero por razones diferentes.
2. El piñón es crítico por **impacto y logística** (catastrófico).
3. El sello es crítico por **frecuencia** (desgaste recurrente).
4. El inventario recomendado es completamente distinto.
5. La metodología integrada permite justificar y documentar decisiones.
6. ISO 55001 y ISO 22301 respaldan formalmente estas conclusiones.

12.9. Cierre del capítulo

Este análisis demuestra cómo la combinación de:

- confiabilidad,
- riesgo,
- logística,
- continuidad operacional,
- modelamiento matemático
- y normas internacionales,

permite construir una justificación sólida para la gestión de repuestos críticos.

La comparación entre el piñón del chancador y el sello mecánico evidencia la importancia del método y la necesidad de decisiones diferenciadas.

El resultado final es un sistema de gestión que optimiza disponibilidad, reduce riesgo operativo y fortalece la continuidad de la operación minera.

CAPÍTULO 13 – CONCLUSIONES GENERALES

La presente tesina desarrolló un análisis completo, técnico y estratégico sobre la gestión de repuestos críticos en minería, integrando confiabilidad, logística, continuidad operacional, modelamiento cuantitativo y estándares internacionales como ISO 55000, ISO 55001 y ISO 22301. Este capítulo sintetiza los principales hallazgos y establece las conclusiones claves que permiten sustentar decisiones corporativas de alto impacto dentro de una planta concentradora moderna.

13.1. La gestión de repuestos críticos es un pilar de la continuidad operacional

Uno de los hallazgos centrales de esta tesina es que **los repuestos críticos no son un costo**, sino un **seguro operativo** que protege el negocio minero frente a fallas de alto impacto.

En minería, donde:

- la detención del chancado o la molienda puede costar cientos de miles de dólares por hora,
- el lead times superan los 90–150 días,

- la logística depende de proveedores internacionales,
- y las condiciones de operación aceleran desgaste,

el inventario crítico se transforma en un elemento esencial para asegurar la continuidad.

13.2. ISO 55001 aporta gobernanza, trazabilidad y disciplina técnica

El análisis mostró que ISO 55001 no es una norma teórica, sino un marco práctico que:

- formaliza roles y responsabilidades,
- exige procesos documentados,
- entrega trazabilidad a decisiones,
- obliga a integrar mantenimiento, operaciones y abastecimiento,
- y permite justificar inventarios críticos ante auditorías y finanzas.

La norma fortalece la alineación entre estrategia corporativa y decisiones operacionales.

13.3. ISO 22301 complementa ISO 55001 desde la perspectiva de la continuidad

Mientras ISO 55001 gestiona activos, **ISO 22301 gestiona vulnerabilidades y resiliencia**. Este estudio demuestra que ambas normas combinadas generan un marco robusto para:

- analizar riesgos operativos,
- evaluar vulnerabilidad logística,
- anticipar interrupciones,
- definir inventarios mínimos esenciales,
- asegurar que repuestos críticos estén disponibles en contingencias.

En minería chilena, donde la localización remota aumenta el riesgo logístico, esta complementariedad es decisiva.

13.4. Los modelos cuantitativos permiten justificar el inventario con evidencia

La tesina integró modelos como:

- EOQ modificado,
- ROP,
- Stock de seguridad,
- Weibull,
- MTBF y MTTR,

- análisis probabilístico de fallas,
- análisis de riesgo y costo-beneficio.

Estos modelos permiten demostrar matemáticamente que:

- mantener un piñón en bodega es más rentable que enfrentar una falla sin repuesto;
- asegurar stock de sellos evita pérdidas recurrentes;
- el costo financiero del inventario es mínimo comparado con el costo de una detención.

La evidencia cuantitativa elimina subjetividad y sesgos.

13.5. La confiabilidad operacional es la base técnica del inventario crítico

El análisis mostró que las decisiones deben basarse en:

- confiabilidad del activo,
- distribución de fallas,
- patrones de desgaste,
- monitoreo predictivo,
- condición real medida en línea,
- análisis FMEA o FMEDA.

Esto permite transformar la gestión de repuestos en un proceso científico y objetivo.

13.6. La cadena logística es un factor crítico en el análisis de riesgo

Una de las conclusiones más importantes es que **el principal riesgo no es la falla del equipo... es el lead time del repuesto.**

El estudio demostró que:

- los proveedores no mantienen stock local,
- el inventario internacional opera con variabilidad,
- el lead times reales superan los contractuales,
- los atrasos marítimos son comunes,
- la dependencia OEM es absoluta en ciertos componentes.

Por lo tanto, el inventario crítico es la única garantía frente al riesgo logístico.

13.7. El análisis comparativo demuestra la necesidad de decisiones diferenciadas

El Capítulo 12 dejó en evidencia que no todos los repuestos críticos son iguales:

- el **piñón del chancador primario** es crítico por impacto catastrófico y lead time;
- el **sello mecánico** es crítico por frecuencia de falla y rotación.

Esto demuestra que:

- el inventario crítico no es uniforme;
- cada componente requiere un análisis específico;
- la criticidad integrada es el método correcto.

13.8. Un sistema integrado es la única forma de asegurar decisiones consistentes

La tesina presenta un **modelo integrado**, donde:

- ISO 55001 aporta gobernanza,
- ISO 22301 aporta continuidad,
- RCM aporta confiabilidad,
- SAP PM aporta trazabilidad,
- los modelos matemáticos aportan evidencia,
- la logística aporta realismo de plazos,
- y las finanzas aportan análisis de valor.

Cuando estos elementos se articulan, la organización logra:

- disponibilidad estable,
- reducción del downtime,
- menor exposición a riesgos logísticos,
- decisiones financieras fundamentadas,
- cumplimiento normativo,
- y sostenibilidad operacional.

13.9. Recomendaciones clave para la industria minera

A partir del análisis completo, se recomiendan:

1. Mantener inventarios asegurados para equipos de impacto catastrófico

(Piñones, motores, variadores, ejes críticos).

2. Utilizar lead time real, no contractual, en ROP/SS.

3. Implementar monitoreo predictivo para repuestos de desgaste.

4. Realizar workshops de criticidad integrados entre áreas.

5. Validar inventarios con análisis costo-beneficio.

6. Incorporar auditorías internas trimestrales ISO 55001.

7. Formalizar fichas de criticidad por cada repuesto crítico.

8. Adoptar modelos híbridos Push/Pull.

13.10. Cierre general

La gestión de repuestos críticos es un elemento estratégico para cualquier operación minera que aspire a competitividad, continuidad operacional y excelencia técnica.

Este estudio demuestra que la combinación de:

- estándares internacionales,
- análisis cuantitativo riguroso,
- evaluación del riesgo,
- confiabilidad operacional,
- integración logística,
- y gobernanza corporativa,

permite establecer un sistema robusto que protege la producción, reduce riesgos y genera valor sostenible para la organización.

La minería moderna ya no puede depender de decisiones intuitivas o históricas: requiere un enfoque técnico, normativo y analítico como el desarrollado en esta tesina.

CAPÍTULO 14 – TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y MINERÍA 4.0 EN LA GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS

La transformación digital está redefiniendo la forma en que las operaciones mineras gestionan activos, planifican mantenimiento y toman decisiones sobre repuestos críticos. La integración de tecnologías avanzadas como IIoT, Machine Learning, Inteligencia Artificial, Digital Twins y plataformas de Asset Performance Management (APM) permite construir sistemas predictivos, precisos y resilientes, capaces de anticipar fallas, optimizar inventarios y garantizar continuidad operacional.

Este capítulo desarrolla el marco conceptual, tecnológico y práctico de la Minería 4.0 aplicado a la gestión de repuestos críticos.

14.1. Evolución hacia Minería 4.0

La minería pasó de:

- **Mantenimiento correctivo → Preventivo → Predictivo → Autónomo,**
- **Inventarios históricos → Modelados → Predictivos,**
- **Datos aislados → Integración OT/IT,**
- **SAP como repositorio → SAP + plataformas APM + sensores conectados,**
- **Repuestos por intuición → Repuestos con evidencia + modelos analíticos.**

Minería 4.0 implica:

- Alta instrumentación,
- Toma de decisiones en tiempo real,
- Integración total entre confiabilidad, mantenimiento e inventario,
- Automatización de procesos críticos.

14.2. Internet Industrial de las Cosas (IIoT)

IIoT permite instalar sensores que capturan variables en tiempo real desde los activos:

- Vibraciones
- Temperatura
- Presión
- Flujo
- Consumo eléctrico
- Desgaste metálico
- Sonido ultrasónico
- Velocidad de rotación

Aplicación en repuestos críticos:

- Detecta desgaste real del piñón del chancador.
- Predice falla del sello mecánico por variación de presión.
- Determina degradación de rodamientos.
- Detecta desalineación de bombas.
- Evalúa vida útil remanente de motores.

Beneficio directo:

Permite ajustar niveles de inventario a condición real, no a históricos.

14.3. Machine Learning para predicción de fallas

Los algoritmos de Machine Learning permiten analizar:

- fallas históricas,
- comportamiento operacional,
- patrones de vibración,
- consumo energético,
- cargas variables de mineral,
- intervenciones de mantenimiento,
- temperatura y lubricación.

Algoritmos típicos:

- Random Forest
- XGBoost
- Redes neuronales
- SVM
- Modelos híbridos con señal + minería de datos SAP

Resultados:

- Pronóstico de probabilidad de falla en horas o días específicos.
- Ajuste dinámico del inventario crítico.
- Eliminación de compras reactivas.
- Reducción de roturas imprevistas.

14.4. Digital Twins (Gemelos Digitales)

Un **gemelo digital** es una réplica virtual del activo físico que simula:

- cargas reales,
- desgaste acumulado,
- vibraciones,
- tensiones,
- vida útil remanente,
- escenarios operacionales.

Aplicación en repuestos críticos:

- Simular la degradación del piñón y del eje del chancador.
- Proyectar vida útil del sello mecánico según densidad de pulpa.
- Evaluar cuándo comprar repuestos según predicción de desgaste.
- Optimizar la programación de mantenimiento.

Los gemelos digitales se están volviendo estándar en minería mundial.

14.5. Asset Performance Management (APM)

APM es la plataforma que integra:

- confiabilidad,
- mantenimiento,
- inventario,
- datos en tiempo real,
- predicción,
- análisis financiero.

APM toma datos desde SAP PM, IIoT, SCADA, historia de fallas y logística, y construye un modelo de desempeño del activo.

Beneficios:

- Identificación de repuestos críticos por riesgo real.
- Cálculo dinámico de ROP y SS.
- Alarmas predictivas sobre inventario.
- Integración con ISO 22301 para continuidad operacional.

14.6. Integración OT/IT en minería (nuevo)

La convergencia entre:

- **OT (Operational Technology)** → PLC, SCADA, sensores
- **IT (Information Technology)** → SAP, APM, bases de datos

permite decisiones más rápidas y precisas.

Ejemplo:

Si el sensor de vibración reporta desgaste acelerado en un rodamiento SAG, el sistema APM ajusta:

- fecha anticipada de mantenimiento
- necesidad de repuesto
- nivel de stock de seguridad
- potencial necesidad de importación urgente

Esto reduce detenciones no programadas.

14.7. Automatización logística y robótica

Las bodegas mineras modernas integran:

- sistemas RFID,
- drones de inspección,
- robots de conteo,
- AGV (vehículos guiados autónomos).

Impacto directo:

- reducción de pérdidas,
- exactitud del inventario,
- trazabilidad total.

Los repuestos críticos son monitoreados individualmente.

14.8. Blockchain para trazabilidad de repuestos

El blockchain permite:

GESTIÓN DE REPUESTOS CRÍTICOS Y ESENCIALES PARA LA GRAN MINERÍA EN CHILE CONFORME A LA NORMA ISO 55000

- asegurar autenticidad del repuesto,
- evitar falsificaciones,
- registrar cada movimiento desde el OEM a bodega,
- crear trazabilidad de por vida del componente.

Esto es vital para repuestos de alto valor como:

- piñones,
- rodamientos especiales,
- variadores,
- ejes de bombas.

14.9. Uso de Big Data en decisiones de inventario

Con miles de datos disponibles, Big Data permite:

- analizar años de historial SAP PM,
- correlacionar fallas con condiciones de mineral,
- identificar patrones ocultos,
- recalcular MTBF con precisión,
- predecir demanda anual del repuesto,
- ajustar curva Weibull según operación real.

Esto eleva la gestión de inventario a un nivel científico.

14.10. Modelos predictivos para inventarios críticos

Integrando datos de sensores + Machine Learning + APM, pueden construirse modelos como:

Modelo 1: Inventario Basado en Vida Útil Remanente (RUL)

- Si RUL baja → aumenta ROP.
- Si RUL se estabiliza → baja SS.

Modelo 2: Inventario Basado en Probabilidad Dinámica de Falla (PdF)

- PdF > 3% en ventana de 30 días → activar compra.
- PdF < 1% → mantener stock.

Modelo 3: Inventario Basado en Riesgo Sostenido

- Combina costos, confiabilidad y condición real.

14.11. Minería autónoma y su impacto en repuestos críticos

Los equipos autónomos (camiones, cargadores, perforadoras) tienen:

- sensores redundantes,
- diagnósticos automáticos,
- sistemas predictivos integrados.

Esto genera:

- menor variabilidad en fallas,
- cambios en criticidad de ciertos repuestos,
- nuevas necesidades de repuestos electrónicos.

14.12. Desafíos de implementación digital

Los principales desafíos son:

- Integración de múltiples sistemas (SCADA, SAP, APM).
- Calidad de los datos históricos.
- Capacitación del personal.
- Costos iniciales de implementación.
- Gobernanza y ciberseguridad.
- Resistencia al cambio.

14.13. Hoja de ruta recomendada para una operación minera real

Fase 1 (0–6 meses):

- Auditoría criticidad
- Integración SAP PM – IIoT básica
- Revisión de lead times reales
- Ajuste inicial de inventario crítico

Fase 2 (6–18 meses):

- Implementación APM
- Modelos predictivos básicos
- Digitalización de fichas de criticidad

- Gemelos digitales en equipos clave

Fase 3 (18–36 meses):

- Machine Learning avanzado
- Inventory Optimization AI
- Integración ISO 22301 totalmente automatizada
- Bodega autónoma de repuestos críticos

14.14. Cierre del capítulo y visión futura

La transformación digital está redefiniendo la gestión de activos y repuestos críticos.
La minería 2025–2030 será:

- predictiva,
- autónoma,
- basada en datos,
- integrada bajo ISO 55001,
- resiliente con ISO 22301,
- optimizada mediante IA.

La empresa que adopte estos sistemas no solo reducirá downtime:
ganará productividad, resiliencia y valor competitivo a largo plazo.

15. BIBLIOGRAFÍA

15.1. Normas y estándares internacionales

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology*. ISO.

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements*. ISO.

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55002: Asset management — Management systems — Guidelines for the application of ISO 55001*. ISO.

International Electrotechnical Commission. (2010). *IEC 60812: Analysis techniques for system reliability — Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*. IEC.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 22301: Security and resilience — Business continuity management systems — Requirements*. ISO.

15.2. Gestión de activos y confiabilidad

Hastings, N. A. J. (2015). *Physical asset management*. Springer.

Woodhouse, J. (2014). *Asset management decision-making*. ICE Publishing.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Smith, R., & Hawkins, B. (2004). *Lean maintenance*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

15.3. Inventarios, logística y modelos cuantitativos

Silver, E. A., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). *Inventory management and production planning and scheduling* (3rd ed.). Wiley.

Nahmias, S. (2009). *Production and operations analysis* (6th ed.). McGraw-Hill.

Zipkin, P. (2000). *Foundations of inventory management*. McGraw-Hill.

Waters, D. (2003). *Inventory control and management*. Wiley.

15.4. Riesgo operacional y continuidad

Kaplan, R. S., & Mikes, A. (2012). Managing risks: A new framework. *Harvard Business Review*, 90(6), 48–60.

Aven, T. (2015). *Risk analysis*. Wiley.

ISO. (2019). *ISO 31000: Risk management — Guidelines*. International Organization for Standardization.

15.5. Minería, mantenimiento y cadena de suministro

Newmont Mining Corporation. (2019). *Maintenance and reliability best practices in mining operations*. Newmont Technical Report.

Codelco. (2021). *Modelo de gestión de activos físicos*. Corporación Nacional del Cobre de Chile.

Antofagasta Minerals. (2020). *Gestión de continuidad operacional y activos críticos*. Documento corporativo interno.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.

15.6. Transformación digital, Minería 4.0 y analítica avanzada

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.

Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 508–517.

Schwab, K. (2016). *The fourth industrial revolution*. World Economic Forum.

McKinsey & Company. (2021). *Digital twins: The next frontier of operational excellence*. McKinsey Global Institute.

Gartner. (2022). *Asset performance management in heavy industry*. Gartner Research.

15.7. Contexto chileno y regulatorio

Ministerio de Minería de Chile. (2022). *Política nacional minera 2050*. Gobierno de Chile.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2023). *Reglamento de seguridad minera (DS 132)*. Gobierno de Chile.

Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2023). *Análisis de costos y productividad en la gran minería del cobre*. Gobierno de Chile.