UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO – CHILE

MAINTENANCE READINESS EN LA GRAN MINERÍA DEL COBRE EN CHILE: ANÁLISIS COMPARATIVO DE MARCOS CORPORATIVOS Y PROPUESTA METODOLÓGICA

ANDRÉS SÁNCHEZ RUGGIERO

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

PROFESOR GUÍA : SR. PABLO VIVEROS GUNCKEL

OCTUBRE 2026

Santiago, 14 de octubre de 2026

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 X Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Maintenance Readiness en la gran minería del cobre en Chile: Análisis comparativo de marcos corporativos y propuesta metodológica

Nombre del candidato(a): Andrés Sánchez Ruggiero

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Campus Santiago, Vitacura **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pablo Viveros Gunckel, 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)

X 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: *23-10-2026* **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 22/10/26 **Firma:** _____

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

Resumen Ejecutivo

Este trabajo analiza comparativamente los marcos corporativos de Maintenance Readiness (MR) que cuatro compañías de la gran minería del cobre en Chile aplican para preparar el mantenimiento en la entrega de sus proyectos a la operación, y a partir de ese análisis desarrolla una propuesta metodológica para mejorar y estandarizar su aplicación en el marco de la Gestión de Activos.

El estudio abarca los marcos de Antofagasta Minerals (AMSA), Anglo American, BHP y Codelco. La metodología es analítico-comparativa y cualitativa: se basa en la revisión de la documentación normativa interna de cada compañía, tratada con una convención de anonimización y un registro interno de trazabilidad, y utiliza una escala única de valoración y una regla explícita para identificar brechas, definidas antes del análisis para acotar el juicio del autor.

Los principales hallazgos indican que, en las dimensiones y la documentación analizadas, el marco de Anglo American presenta el mayor desarrollo temático, estructurado en ocho temáticas con enfoque multidisciplinario. El de Codelco muestra la mayor formalización de entregables por fase de proyecto, articulada con su Sistema Operativo de Mantenimiento (SOMA). BHP establece, a través del MECoE, un conjunto acotado y preciso de requisitos mínimos, mientras que la documentación de AMSA sobre la entrega de proyectos se orienta a la gobernanza del proceso, la configuración de sistemas de información y la definición de estrategias de mantenimiento. Estas diferencias describen el contenido de los documentos revisados y no constituyen una evaluación de la gestión de mantenimiento de cada compañía.

El análisis identificó diez brechas documentales, es decir, elementos que los marcos no desarrollan y cuya ejecución queda entregada al criterio de cada equipo de proyecto. Ninguno de los cuatro marcos establece criterios para verificar la efectividad del MR antes del cierre, indicadores de avance y calidad ni un mecanismo de retroalimentación posterior al arranque, y tres de ellos no articulan el MR con el sistema de gestión de activos ni ajustan sus exigencias a la complejidad del proyecto.

La propuesta organiza el MR en cinco etapas con gates: planificación y gobernanza, caracterización técnica de activos, definición de estrategias y tácticas de mantenimiento, habilitación de sistemas e información, y verificación y cierre. Las complementan un mecanismo de escalamiento según la complejidad del proyecto, un modelo de gobernanza de cinco roles en el que el área receptora revisa y acepta los entregables, un sistema de trece indicadores con un tablero de seis para decidir el

traspaso, en el que la seguridad no admite excepciones, y la vinculación de cada etapa con los requisitos de ISO 55001:2024. Ninguno de los marcos estudiados desarrolla más de tres de sus diez mecanismos.

La propuesta se evaluó mediante la cobertura de las diez brechas, el contraste con referentes externos y su aplicación retrospectiva a un proyecto real de mejoras en una planta concentradora, en el que el autor participó como especialista de mantenimiento. El caso mostró que las cinco etapas pueden aplicarse con la información disponible en un proyecto real y que la metodología habría puesto en evidencia, antes del traspaso, los principales problemas observados: el ingreso tardío de mantenimiento, los repuestos sin código, las capacitaciones incompletas y un cierre sin verificación de efectividad. La validación por juicio experto queda definida como protocolo para una etapa posterior.

Se concluye que el mayor potencial de mejora del MR en el sector está en tres prácticas que hoy no establece ninguno de los marcos estudiados y que la industria podría adoptar en conjunto: verificar la preparación del mantenimiento antes del traspaso, medirla con indicadores y retroalimentarla después del arranque. La propuesta está orientada a la gran minería del cobre en Chile, pero es adaptable a otros contextos de la Gestión de Activos.

Tabla de contenidos

Resumen Ejecutivo **2**

Índice de tablas **6**

Índice de figuras **7**

1 Introducción **8**

2 Objetivos y Alcance **10**

2.1 Objetivo General 10
2.2 Objetivos Específicos 10
2.3 Alcance 11

3 Metodología **13**

3.1 Enfoque Metodológico 13
3.2 Fuentes de Información 13
3.3 Proceso de Análisis 14
3.4 Limitaciones del Estudio 15
3.5 Tratamiento de la Confidencialidad y Trazabilidad de las Fuentes 16
3.6 Criterios de Valoración Comparativa y de Identificación de Brechas 17

4 Desarrollo del Tema **20**

4.1 Marco Teórico y Conceptual 20
4.1.1 Gestión de Activos y la Norma ISO 55001 20
4.1.2 Operational Readiness y Maintenance Readiness 21
4.1.3 Comisionamiento, Puesta en Marcha y Arranque 22
4.1.4 Conceptos Clave del Proceso de MR 23
4.2 Contexto: La Gran Minería del Cobre en Chile 23
4.2.1 Panorama de la Industria 23
4.2.2 Desafíos Específicos del MR en la Minería 24
4.2.3 Caracterización de las Empresas Estudiadas 25
4.3 Caracterización de los Requerimientos de Maintenance Readiness por Compañía 26
4.3.1 Anglo American 26
4.3.2 BHP 27
4.3.3 Codelco 27
4.3.4 AMSA 28
4.4 Análisis Comparativo 29

4.5 Factores Críticos de Éxito, Brechas y Buenas Prácticas 31
4.5.1 Factores Críticos de Éxito 32
4.5.2 Brechas Documentales Identificadas 32
4.5.3 Buenas Prácticas Transferibles 34
4.6 Propuesta Metodológica para la Gestión de Maintenance Readiness 35
4.6.1 Estructura General de la Propuesta 35
4.6.2 Escalamiento según la Complejidad del Proyecto 37
4.6.3 Modelo de Gobernanza 39
4.6.4 Sistema de Indicadores y Tablero de Preparación 41
4.6.5 Contribución de la Propuesta a la Gestión de Activos 44
4.6.6 Trazabilidad Brecha-Mecanismo y Valor Agregado 46
4.6.7 Criterios de Validación de la Propuesta 49
4.7 Aplicación de la Metodología a un Caso 51
4.7.1 Descripción del Caso 51
4.7.2 Aplicación Retrospectiva de la Metodología 52
4.7.3 Evaluación de la Aplicación 54
4.7.4 Hallazgos sobre la Ejecución del Maintenance Readiness 55
4.8 Discusión de los Resultados 56
5 Planes de Acción y Mejora 59
5.1 Hoja de Ruta para la Adopción de la Propuesta 59
5.2 Oportunidades de Mejora para los Marcos Estudiados 60
6 Conclusiones y Recomendaciones 62
6.1 Cumplimiento de los Objetivos 62
6.2 Trazabilidad de los Objetivos 63
6.3 Limitaciones 64
6.4 Aspectos Pendientes de Validación y Líneas Futuras 65
6.5 Recomendaciones 65
7 Bibliografía 67
8 Anexos 68
8.1 Anexo A: Glosario de Términos 68
8.2 Anexo B: Protocolo de Validación por Juicio Experto 70

Índice de tablas

Tabla 1. Escala de valoración aplicada en el análisis comparativo 17
Tabla 2. Anclaje de la escala en las seis dimensiones del análisis comparativo 18
Tabla 3. Síntesis de los marcos de Maintenance Readiness por compañía 28
Tabla 4. Catálogo de brechas documentales identificadas en los marcos de Maintenance Readiness 33
Tabla 5. Etapas de la propuesta metodológica: objetivo, actividades, responsables y herramientas 37
Tabla 6. Criterios de clasificación del proyecto para el escalamiento del Maintenance Readiness 38
Tabla 7. Exigencias del Maintenance Readiness según el nivel de complejidad del proyecto. 38
Tabla 8. Matriz de responsabilidades (RACI) del proceso de Maintenance Readiness 41
Tabla 9. Sistema de indicadores de avance, calidad y resultado del proceso de Maintenance Readiness 42
Tabla 10. Tablero de preparación para el traspaso a mantenimiento 44
Tabla 11. Contribución de cada etapa de la propuesta a la gestión de activos 45
Tabla 12. Trazabilidad entre las brechas documentales y el mecanismo metodológico que las resuelve 47
Tabla 13. Valor agregado de la propuesta respecto de los cuatro marcos estudiados 48
Tabla 14. Contraste de las etapas de la propuesta con referentes externos 50
Tabla 15. Aplicación retrospectiva de las cinco etapas al caso 52
Tabla 16. Tablero de preparación reconstruido para el caso 54
Tabla 17. Evaluación de la propuesta a partir del caso 55
Tabla 18. Hoja de ruta para la adopción de la propuesta metodológica 59
Tabla 19. Oportunidades de mejora para los marcos de Maintenance Readiness estudiados 61
Tabla 20. Trazabilidad de los objetivos específicos 64
Tabla 21. Instrumento de evaluación de la propuesta por juicio experto 71

Índice de figuras

Figura 1. Diseño metodológico de la investigación: fases, insumos, productos y objetivos específicos asociados 15
Figura 2. Árbol de decisión para clasificar una diferencia observada como brecha documental 19
Figura 3. Componentes del Operational Readiness y rol del Maintenance Readiness 21
Figura 4. Posicionamiento del Maintenance Readiness en el ciclo de proyecto 22
Figura 5. Desafíos específicos del Maintenance Readiness en proyectos de la gran minería . 25
Figura 6. Lógica de organización de los requerimientos de Maintenance Readiness en cada marco 26
Figura 7. Nivel de desarrollo documental por dimensión en los cuatro marcos de Maintenance Readiness 30
Figura 8. Mapa de cobertura de componentes de Maintenance Readiness por compañía 31
Figura 9. Nivel de desarrollo de los elementos asociados a cada brecha documental en los cuatro marcos 34
Figura 10. Integración de las etapas del Maintenance Readiness al ciclo de inversión, con sus gates y criterios de salida 36
Figura 11. Clasificación del proyecto y exigencias acumulativas del Maintenance Readiness según su nivel de complejidad 39
Figura 12. Nivel de participación de cada rol a lo largo de las cinco etapas de la propuesta ... 40
Figura 13. Flujo de decisión del tablero de preparación para el traspaso a mantenimiento 44
Figura 14. Línea de vista entre los objetivos de la organización y los entregables del Maintenance Readiness 45
Figura 15. Cadena de trazabilidad entre brecha documental, mecanismo, etapa e indicador de verificación 48
Figura 16. Hoja de ruta para la adopción de la propuesta: acciones por horizonte e hitos esperados 60

1 Introducción

La minería es una de las actividades más relevantes de la economía chilena: en 2025 aportó cerca del 13% del Producto Interno Bruto y del orden del 59% de las exportaciones del país, con el cobre como principal producto (Consejo Minero, 2026). Las compañías que operan en este sector gestionan activos de alta complejidad técnica y elevado valor de capital, lo que exige procesos rigurosos de planificación, ingeniería y gestión a lo largo de todo el ciclo de vida de sus instalaciones.

En este contexto, los proyectos de inversión minera, que pueden involucrar expansiones de plantas concentradoras, instalaciones de lixiviación, sistemas de transporte de mineral, infraestructura de agua y energía, entre otros, requieren de un proceso sistemático de preparación para asegurar que los activos entren en operación en condiciones adecuadas de confiabilidad, mantenibilidad y seguridad. Este proceso es conocido internacionalmente como Operational Readiness (OR) o Alistamiento Operacional, dentro del cual el Maintenance Readiness (MR) constituye el componente que busca asegurar que los sistemas de mantenimiento, las estrategias, los datos maestros, los recursos y las competencias necesarias estén disponibles antes del inicio de la operación.

Las deficiencias en la preparación del mantenimiento, como la documentación tardía de los proveedores, el personal sin capacitar, los repuestos que no están en faena o un CMMS incompleto, retrasan el arranque, reducen la disponibilidad de la planta y postergan la producción de régimen, con un menor retorno del capital invertido (LeBlanc, 2014). Los retrasos en el arranque, los tiempos excesivos de ramp-up y los planes preventivos desalineados con el CMMS figuran también entre los problemas típicos que describen los proveedores de servicios de confiabilidad (Metso Outotec, 2022). A pesar de su relevancia, el nivel de formalización y estandarización de estos procesos varía considerablemente entre las compañías que operan en el país.

En Chile, las empresas de la gran minería del cobre han desarrollado marcos normativos propios para el MR, con distintos grados de desarrollo, alcance y exigencia. Compañías como Anglo American, BHP, Codelco y Antofagasta Minerals (AMSA) han elaborado guías, procedimientos y estándares corporativos que orientan la ejecución de estos procesos, pero cuyas estructuras, énfasis y requerimientos difieren significativamente entre sí. Esta variabilidad genera dificultades tanto para los equipos de proyecto que deben ejecutar el MR bajo distintos marcos regulatorios, como para los proveedores de servicios que trabajan para múltiples compañías.

En la experiencia profesional del autor en servicios de Maintenance Readiness y Operational Readiness para compañías de la gran minería, algunos de los problemas más recurrentes son:

- Falta de claridad sobre los entregables requeridos y sus estándares de calidad.
- Incorporación tardía del equipo de mantenimiento en el ciclo de proyecto.
- Desconexión entre las definiciones técnicas del proyecto y la configuración del CMMS/SAP.
- Ausencia de criterios formales para la verificación y aceptación de entregables.
- Variabilidad en los perfiles profesionales asignados a estas actividades.

Frente a este escenario, surge la oportunidad de realizar un análisis comparativo sistemático de los requerimientos de MR establecidos por las principales compañías del sector, con el objetivo de identificar brechas, buenas prácticas y elementos comunes que permitan desarrollar una propuesta metodológica que aporte claridad, ordenamiento y consistencia al proceso, contribuyendo a su mejora y estandarización. La pregunta que orienta el trabajo es, en consecuencia, en qué se diferencian los requisitos de Maintenance Readiness que establecen las principales compañías de la gran minería del cobre en Chile y qué elementos debería integrar una metodología que estandarice su aplicación.

La investigación aborda este desafío combinando el análisis documental de estándares corporativos con la perspectiva práctica derivada de la ejecución de proyectos reales. La investigación se enmarca en los principios de la Gestión de Activos según la norma ISO 55001, que establece que la planificación y el control del ciclo de vida de los activos deben ser sistemáticos, documentados y consistentes con los objetivos de la organización.

El documento se organiza en ocho capítulos. Tras esta introducción, el capítulo 2 define los objetivos y el alcance, y el capítulo 3 describe la metodología, incluidos el tratamiento de la confidencialidad y los criterios de valoración. El capítulo 4 desarrolla el tema: el marco teórico, el contexto de la gran minería del cobre, la caracterización y la comparación de los cuatro marcos, los factores críticos y las brechas documentales, la propuesta metodológica, su aplicación a un caso y la discusión de los resultados. El capítulo 5 presenta los planes de acción para la adopción de la propuesta, el capítulo 6 las conclusiones y recomendaciones, y los capítulos 7 y 8 la bibliografía y los anexos.

2 Objetivos y Alcance

2.1 Objetivo General

Analizar comparativamente los requerimientos establecidos por compañías de la gran minería del cobre en Chile para el desarrollo de procesos de Maintenance Readiness durante las fases de comisionamiento y puesta en marcha, y desarrollar una propuesta metodológica que contribuya a mejorar y estandarizar su aplicación en el contexto de la Gestión de Activos.

2.2 Objetivos Específicos

- OE1: Caracterizar los requerimientos de Maintenance Readiness solicitados por compañías de la gran minería del cobre en Chile, identificando alcances generales, entregables clave y prácticas habituales asociadas al proceso.
- OE2: Comparar los requerimientos y enfoques de Maintenance Readiness entre las compañías estudiadas, analizando diferencias y similitudes en términos de alcance, nivel de detalle, madurez en gestión de activos, involucramiento de áreas operativas y uso de tecnologías de soporte.
- OE3: Analizar de manera general la forma en que se han abordado históricamente proyectos de Maintenance Readiness, considerando el tipo de actividades realizadas, los perfiles profesionales involucrados y los principales factores que han influido en la eficiencia del proceso.
- OE4: Identificar factores críticos de éxito, dificultades recurrentes y buenas prácticas observadas en la ejecución de proyectos de Maintenance Readiness, relacionándolas con las características de cada organización.
- OE5: Desarrollar una propuesta metodológica que estructure el proceso de Maintenance Readiness en etapas, criterios y actividades esenciales, integrando principios de la Gestión de Activos y orientándose a una aplicación práctica en proyectos mineros.
- OE6: Proponer recomendaciones que apoyen la adopción y aplicación efectiva de la metodología desarrollada, facilitando su uso como herramienta de planificación y mejora continua en la ejecución de proyectos de Maintenance Readiness.

2.3 Alcance

El estudio se centra en el análisis de requerimientos y prácticas asociadas al proceso de Maintenance Readiness en proyectos de la gran minería del cobre en Chile, específicamente en el contexto de las fases de comisionamiento y puesta en marcha. El estudio se basa principalmente en la documentación normativa de las compañías estudiadas, complementada con la experiencia profesional del autor y con la aplicación retrospectiva de la propuesta a un proyecto real ejecutado en Chile.

Las cuatro compañías objeto de análisis son: Antofagasta Minerals S.A. (AMSA), Anglo American, BHP y Codelco. La selección de estas empresas responde a su relevancia en la producción de cobre a nivel nacional, la disponibilidad de documentación técnica revisable y la diversidad de enfoques que representan en cuanto a la gestión de proyectos y activos. Otras compañías del sector, como Collahuasi, cuentan también con documentación sobre mantenibilidad y confiabilidad en proyectos. No se incluyeron en la comparación porque el alcance del estudio se fijó en la propuesta aprobada con cuatro compañías; sin embargo, sus prácticas pueden aportar a la propuesta metodológica, y su análisis queda como línea futura (apartado 6.4).

El alcance del trabajo no incluye un análisis detallado de los procesos de comisionamiento mecánico, eléctrico o de instrumentación, ni cubre los aspectos operacionales o de producción del Operational Readiness que van más allá del componente de mantenimiento. Asimismo, si bien la propuesta metodológica resultante buscará ser de aplicación general dentro del marco de la Gestión de Activos, el análisis empírico se acota al sector de la minería del cobre en Chile, sin intención de extrapolar los datos a otras industrias.

El análisis se focaliza en la preparación del mantenimiento para la entrega a la operación (handover), correspondiente a las fases finales de comisionamiento y puesta en marcha de los proyectos mineros. En esta etapa, el Maintenance Readiness busca asegurar que los sistemas de gestión de mantenimiento, las estrategias y el conocimiento técnico estén implementados y validados para una operación efectiva desde el primer día. Como los marcos corporativos distribuyen parte de sus requisitos en etapas anteriores del ciclo de inversión, incluida la ingeniería, el estudio considera también esos requisitos, en la medida en que condicionan la preparación del mantenimiento al momento del traspaso. Lo que queda fuera del alcance es el análisis de los procesos de diseño y de construcción (EPC) en sí mismos, así como los determinantes de ingeniería que pudieran haber afectado el desempeño posterior de los activos.

Metodológicamente, el trabajo adopta un enfoque analítico y comparativo sustentado en revisión documental y en la identificación de patrones comunes y diferencias relevantes entre compañías, evitando análisis detallados que no aporten directamente al objetivo metodológico.

3 Metodología

3.1 Enfoque Metodológico

La investigación adopta un enfoque analítico-comparativo de carácter cualitativo, sustentado en la revisión y análisis sistemático de documentación técnica corporativa. Este tipo de metodología es apropiado para investigaciones cuyo objetivo central es identificar similitudes, diferencias y patrones entre casos o entidades comparables, en este caso, las prácticas de Maintenance Readiness de cuatro compañías mineras.

La investigación no busca establecer relaciones causales ni generalizar estadísticamente sus hallazgos, sino generar un entendimiento profundo de cómo distintas organizaciones abordan un mismo desafío, la preparación para el mantenimiento de activos antes de su entrada en operación, y extraer de este análisis los insumos necesarios para construir una propuesta metodológica mejorada.

3.2 Fuentes de Información

Las fuentes primarias de información para este trabajo son los documentos técnicos corporativos de las cuatro compañías estudiadas, incluyendo: estándares y normas corporativas de Maintenance Readiness y Operational Readiness, manuales y guías metodológicas, procedimientos de entrega de proyectos, listas de verificación y entregables, y plantillas de datos maestros.

Entre los documentos más relevantes utilizados se encuentran la guía corporativa de Maintenance Readiness de Anglo American, asociada a su función de estrategia y confiabilidad de activos (2019); el estándar corporativo de alistamiento de mantenimiento de BHP, emitido a través de su centro de excelencia de mantenimiento e ingeniería (2022); la norma corporativa de mantenibilidad y confiabilidad en proyectos de inversión de Codelco, articulada con su sistema operativo de mantenimiento (2021); y la documentación interna de AMSA sobre la entrega de proyectos al área de mantenimiento, asociada a su sistema corporativo de entrega de activos. Por las razones expuestas en el apartado 3.5, se omiten los códigos, títulos exactos y números de revisión de estos documentos. Como antecedente complementario se consideró la documentación de trabajo de Codelco sobre la actualización de su sistema operativo de mantenimiento (2026), posterior a la versión de la norma analizada, que se usa en la discusión de los resultados y no en las valoraciones.

Como fuentes secundarias se consideran publicaciones académicas sobre Gestión de Activos, estándares internacionales como la serie ISO 55000, bibliografía especializada en mantenimiento

industrial y gestión de proyectos mineros, así como documentación complementaria de servicios de consultoría ejecutados en las empresas del estudio.

A estas fuentes se suma la experiencia profesional del autor en servicios de Maintenance Readiness y Operational Readiness, junto con la documentación de uno de esos servicios, utilizada en la aplicación retrospectiva de la propuesta del apartado 4.7. Esta fuente se trata con la misma convención de anonimización del apartado 3.5, y su principal limitación, el sesgo del investigador, se aborda en el apartado 3.4.

3.3 Proceso de Análisis

El análisis se estructuró en seis fases sucesivas.

- Fase 1 - Recopilación documental: revisión de estándares corporativos, procedimientos internos, listas de entregables y documentación técnica de los proyectos analizados. Las fuentes corresponden a información de primera mano disponible de Anglo American, BHP, Codelco y AMSA.
- Fase 2 - Caracterización por compañía: descripción estructurada de los requerimientos MR de cada organización, identificando alcance, entregables, herramientas de soporte y alineamiento con estándares de gestión de activos (ISO 55000).
- Fase 3 - Análisis comparativo: construcción de matrices de comparación que permiten identificar similitudes, diferencias, brechas y patrones comunes entre los marcos MR estudiados.
- Fase 4 - Síntesis e identificación de factores clave: a partir del análisis comparativo, se determinan los factores críticos de éxito, las brechas recurrentes y las buenas prácticas más relevantes para el proceso MR.
- Fase 5 - Desarrollo de la propuesta metodológica: diseño de un marco estructurado de 5 etapas con criterios de entrada y salida, actividades clave, herramientas recomendadas, indicadores de desempeño y modelo de gobernanza.
- Fase 6 - Validación de la propuesta: verificación de la cobertura de las brechas, contraste de cada etapa con referentes externos a las compañías estudiadas, aplicación retrospectiva a un proyecto real y definición de un protocolo de juicio experto.

La Figura 1 relaciona cada fase con sus insumos, sus productos y el objetivo específico al que responde.

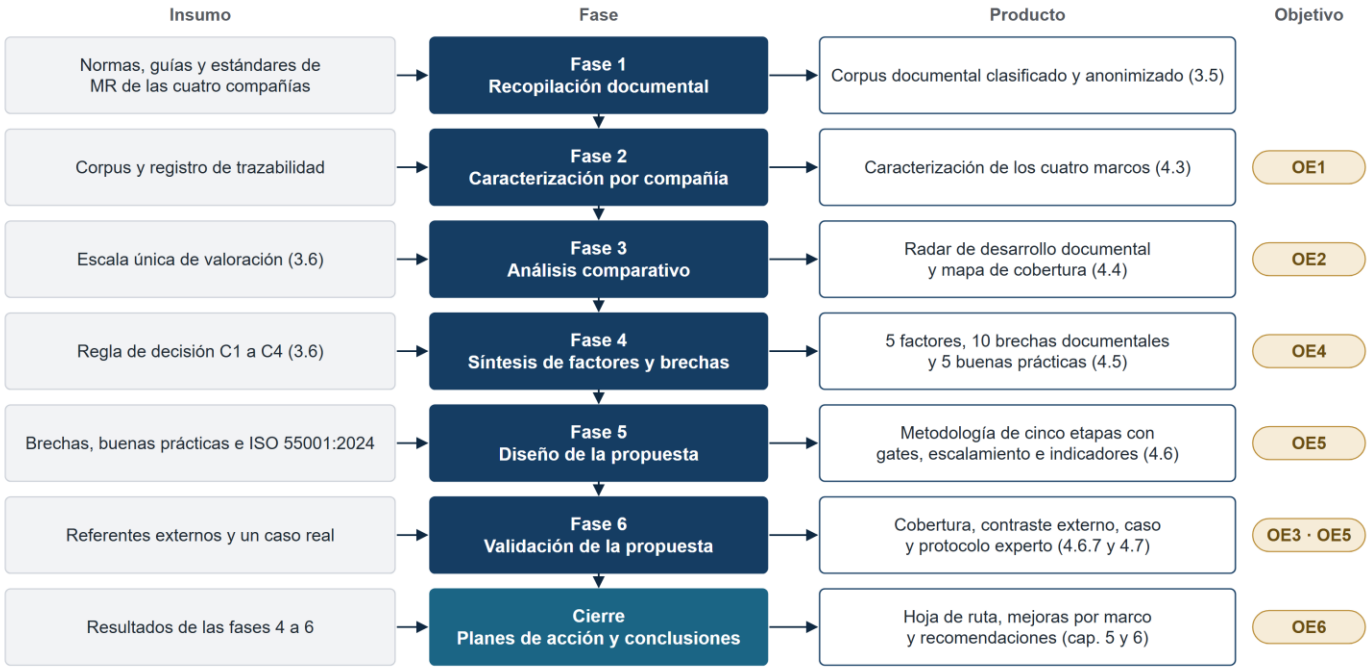

Figura 1. Diseño metodológico de la investigación: fases, insumos, productos y objetivos específicos asociados

3.4 Limitaciones del Estudio

Este trabajo presenta algunas limitaciones metodológicas que deben ser consideradas al interpretar sus resultados. En primer lugar, la información analizada corresponde a documentación técnica y no a entrevistas directas con profesionales de las compañías, lo que puede no reflejar la totalidad de las prácticas informales o emergentes que se aplican en la realidad. En segundo lugar, la disponibilidad de documentación no es uniforme entre las cuatro compañías, lo que puede generar asimetrías en la profundidad del análisis. En tercer lugar, los documentos utilizados corresponden a versiones específicas, con distinto estado de aprobación, que pueden no representar el estado más actualizado de los procesos de cada organización.

Una cuarta limitación se deriva de la naturaleza documental del análisis. Las valoraciones y las brechas identificadas describen lo que establecen los documentos revisados y no la práctica efectiva de cada compañía: un elemento ausente en un estándar puede estar cubierto por procedimientos complementarios o por prácticas de terreno no documentadas. Por esta razón, las brechas se denominan documentales, y sus implicancias se interpretan como el riesgo de que la ejecución de ese elemento dependa del criterio de cada equipo de proyecto, no como deficiencias comprobadas en la gestión de las compañías.

Por último, el estudio está expuesto al sesgo del investigador. El autor se ha desempeñado profesionalmente como consultor en servicios de Maintenance Readiness y Operational Readiness

para compañías incluidas en el estudio, lo que aporta conocimiento del contexto, pero puede influir en la lectura de los documentos y en las valoraciones comparativas. En el caso de una de las compañías, además, la documentación analizada se encontraba en proceso de formalización, y en su desarrollo participó la empresa en la que se desempeña el autor. Por ello, sus valoraciones se refieren a la versión revisada del documento y se obtuvieron con los mismos criterios aplicados a los demás marcos. Para acotar este sesgo se adoptaron cinco resguardos: una escala de valoración con descriptores explícitos, una regla de decisión para identificar brechas (ambas en el apartado 3.6), un registro interno que respalda cada valoración, el contraste de la propuesta con referentes externos a las compañías estudiadas y su aplicación a un caso real.

Estas limitaciones acotan el alcance de las conclusiones, que se refieren al contenido de los documentos revisados y a un caso de aplicación, y se retoman en el apartado 6.3.

3.5 Tratamiento de la Confidencialidad y Trazabilidad de las Fuentes

Buena parte de la documentación analizada en este trabajo corresponde a material normativo interno de las compañías estudiadas, sujeto a restricciones de divulgación. Para conciliar la exigencia académica de trazabilidad con el resguardo de esa información se adoptaron dos decisiones metodológicas. La primera es la clasificación previa de cada documento fuente según su nivel de restricción, distinguiendo entre material de circulación pública, de uso interno y de carácter reservado, criterio que determina qué contenido puede describirse en detalle y cuál solo puede resumirse en términos generales. La segunda es una convención de anonimización: se mantienen los nombres de las compañías, ya definidos en el alcance del estudio, pero se omiten en el cuerpo del informe y en la bibliografía los códigos de documento, los títulos exactos, los números de revisión, las áreas emisoras y los nombres de quienes los elaboraron o aprobaron. El uso de esta documentación se limita a su descripción general con fines académicos, sin reproducir su contenido, de acuerdo con las restricciones de divulgación de cada documento.

Como contrapartida de esa omisión, cada afirmación atribuida a una compañía queda respaldada en un registro de trabajo interno que consigna el documento exacto, su revisión, su fecha, su ubicación y el apartado de esta tesina donde se utiliza. Ese registro no se anexa al informe, pero está disponible para el profesor guía. De este modo la trazabilidad se conserva de manera verificable sin reproducir contenido restringido en un documento de circulación académica. El registro se organiza en dos niveles: el de documento, con la identificación completa de cada fuente, y el de valoración, que consigna para cada nivel asignado en el gráfico de radar, el mapa de cobertura y la matriz de brechas

la fuente codificada y la evidencia que lo justifica según la escala del apartado 3.6, de modo que cada valoración pueda contrastarse con el documento revisado.

3.6 Criterios de Valoración Comparativa y de Identificación de Brechas

Para que la comparación entre los cuatro marcos no dependa de apreciaciones caso a caso, el análisis se apoya en dos criterios explícitos, definidos antes de asignar cualquier valoración. El primero es una escala única de cinco niveles, que se aplica por igual a las seis dimensiones del gráfico de radar, a los ocho componentes del mapa de cobertura y a los elementos asociados a cada brecha. El segundo es una regla de decisión que establece cuándo una diferencia observada entre los marcos constituye una brecha. Las seis dimensiones traducen los criterios de comparación del OE2: el alcance se representa con la amplitud temática; el nivel de detalle, con la formalización de entregables y la profundidad metodológica; el involucramiento de las áreas operativas, con la gobernanza y los roles; y el uso de tecnologías de soporte, con la orientación a sistemas de información. La trazabilidad documental se agregó porque es la condición que permite verificar el cumplimiento de las demás. Los ocho componentes del mapa de cobertura se eligieron a partir de los conceptos clave del apartado 4.1.4 y de los requisitos comunes a los marcos, y todos alcanzan nivel 3 o superior en al menos dos de los cuatro documentos. Cada valoración queda respaldada en el registro interno de trazabilidad descrito en el apartado 3.5.

Tabla 1. Escala de valoración aplicada en el análisis comparativo

Nivel	Denominación	Lo que se observa en el documento revisado	Banda en el mapa de cobertura
1	Ausente	El elemento no se menciona.	Bajo
2	Mencionado	El elemento se nombra o se remite a otro documento, sin requisitos propios.	Bajo
3	Definido	Se establecen requisitos explícitos (qué se exige), sin responsables ni criterios de aceptación.	Medio
4	Desarrollado	Además de los requisitos, se asignan responsables o la oportunidad de ejecución (etapa o hito), o se entregan plantillas de apoyo.	Alto
5	Integral	Requisitos, responsables y oportunidad definidos, junto con criterios de aceptación o verificación y herramientas de apoyo.	Alto

La escala valora el grado de especificación de cada elemento y no la extensión del documento que lo contiene. La precisión es necesaria porque los cuatro documentos son de naturaleza distinta (una guía metodológica extensa, un estándar de requisitos mínimos, una norma corporativa y los

requisitos asociados a un sistema corporativo de entrega de activos), de modo que una valoración basada en el volumen de texto favorecería de forma sistemática a los documentos más largos. Para las seis dimensiones del gráfico de radar, la Tabla 2 precisa qué evidencia corresponde a los niveles 1, 3 y 5 de cada dimensión; los niveles 2 y 4 se asignan cuando la evidencia se sitúa entre dos de esos anclajes. La amplitud temática, en particular, no se estima de forma directa: se calcula a partir del número de componentes que alcanzan al menos el nivel 3 en el mapa de cobertura, lo que vincula ambas herramientas bajo un mismo criterio.

Tabla 2. Anclaje de la escala en las seis dimensiones del análisis comparativo

Dimensión	Nivel 1	Nivel 3	Nivel 5
Amplitud temática	Se calcula desde el mapa de cobertura según el número de componentes con nivel 3 o superior: dos o menos = 1; tres o cuatro = 2; cinco o seis = 3; siete = 4; los ocho = 5.		
Formalización de entregables	No define entregables.	Lista de entregables obligatorios, sin asignarlos a etapas del proyecto.	Entregables asignados a etapas, con responsable y reglas de formato o independencia.
Gobernanza y roles	No define roles.	Nombra roles o perfiles, sin matriz de responsabilidades.	Matriz de responsabilidades por etapa e instancias formales de coordinación entre proyecto y operación.
Profundidad metodológica	Solo exige el entregable.	Indica el método a aplicar (criticidad, RCM u otro) sin guía de aplicación.	Describe el método, sus criterios y ejemplos o plantillas de aplicación.
Orientación a sistemas de información	Sin requisitos sobre el CMMS.	Exige la carga de datos maestros sin especificar su contenido.	Especifica los objetos de datos (jerarquía, listas de materiales, planes, entre otros) y su validación.
Trazabilidad documental	Sin requisitos de control documental.	Exige registrar o entregar la documentación, sin un mecanismo unificado.	Entregables independientes y codificados, con registro y control verificable.

La segunda herramienta es una regla de decisión para la identificación de brechas. Una diferencia observada entre los marcos se clasifica como brecha documental solo cuando cumple cuatro condiciones simultáneas: (C1) existe un referente que demuestra que el elemento es exigible, ya sea un requisito de la norma ISO 55001:2024, una recomendación de la literatura especializada o un desarrollo de nivel 4 o 5 en al menos uno de los cuatro marcos; (C2) en el marco analizado, el elemento obtiene nivel 1 o 2 en la escala de la Tabla 1; (C3) su ausencia puede vincularse con una consecuencia concreta para el resultado del Maintenance Readiness; y (C4) la valoración queda respaldada en el registro interno de trazabilidad, con el documento revisado y la evidencia que la justifica según la escala. Una brecha se considera transversal cuando se presenta en tres o más marcos. La regla no

elimina el juicio del autor, pero lo acota a la asignación de niveles con descriptores conocidos de antemano y permite que cualquier lector verifique por qué una diferencia fue o no considerada brecha.

La Figura 2 representa esta regla como un árbol de decisión, incluida la distinción entre brechas transversales y específicas.

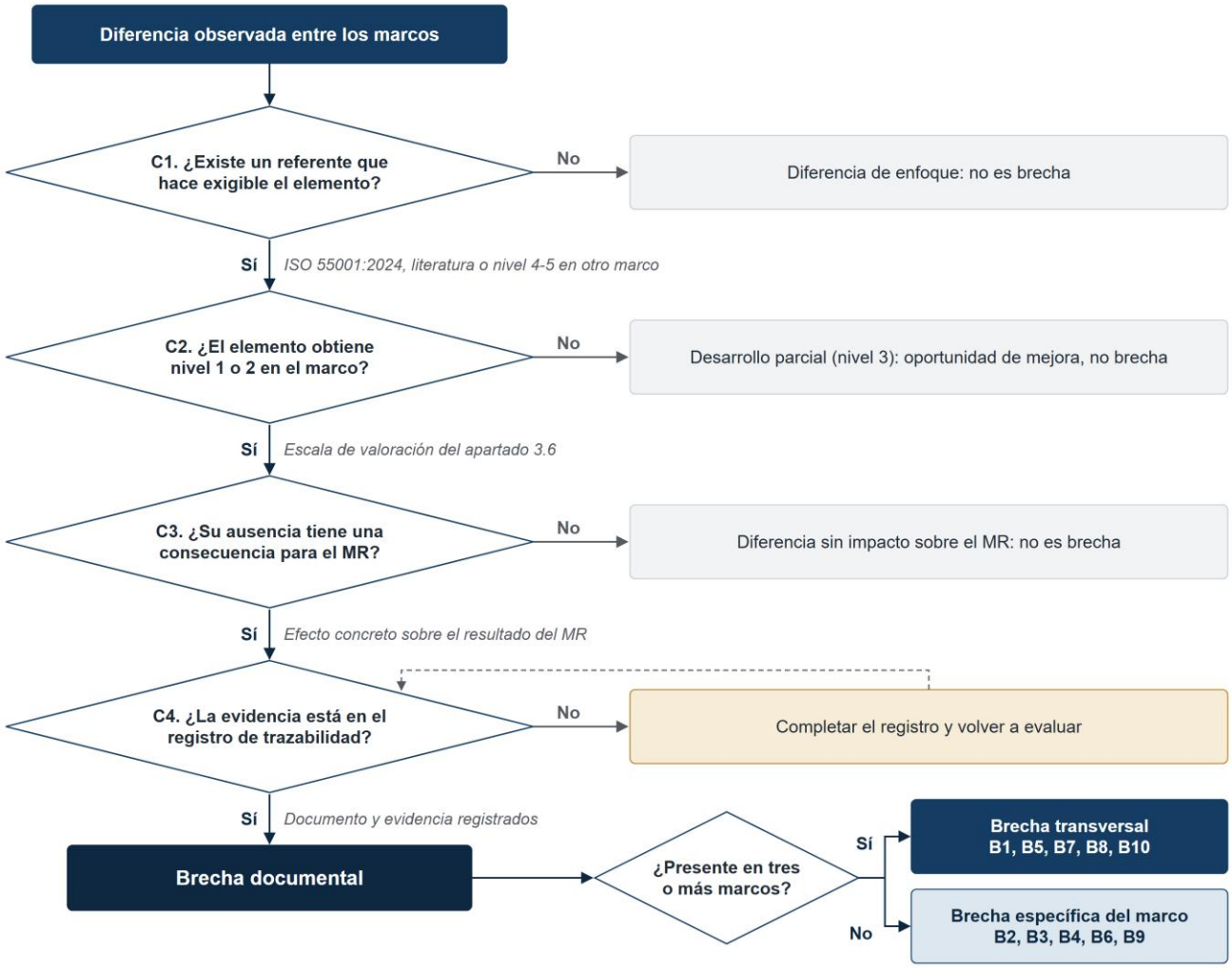

Figura 2. Árbol de decisión para clasificar una diferencia observada como brecha documental

4 Desarrollo del Tema

4.1 Marco Teórico y Conceptual

4.1.1 Gestión de Activos y la Norma ISO 55001

La Gestión de Activos es definida por la norma internacional ISO 55000 como la actividad coordinada de una organización para realizar valor a partir de sus activos (ISO, 2024a). La edición vigente de la norma, publicada en 2024 en reemplazo de la de 2014, precisa que realizar valor implica normalmente equilibrar costos, riesgos, oportunidades y desempeño, y reconoce que los activos físicos (equipos, instalaciones e infraestructura) deben gestionarse de manera sistemática y alineada con los objetivos estratégicos de la organización, considerando todas las etapas de su ciclo de vida.

La norma ISO 55001, por su parte, especifica los requisitos para un sistema de gestión de activos (ISO, 2024b). Su edición de 2024 exige planificar, implementar y controlar los procesos del ciclo de vida, incluidas la creación, la adquisición y el mantenimiento de los activos (cláusula 8.1), e incorpora un requisito específico sobre los datos y la información necesarios para respaldar la gestión de activos (cláusula 7.6). En este contexto, la preparación adecuada de los activos para su operación, es decir, asegurar que estén en condiciones de ser mantenidos de forma óptima desde el primer día de funcionamiento, es un requisito implícito y clave.

El ciclo de vida de los activos físicos comprende las etapas de diseño o creación, adquisición o construcción, operación y mantenimiento, y disposición final (Mitchell, 2007). El Maintenance Readiness se sitúa en la intersección entre la fase de adquisición/construcción y la fase de operación/mantenimiento, constituyendo el puente entre la entrega técnica del proyecto y el inicio de la operación sustentable del activo.

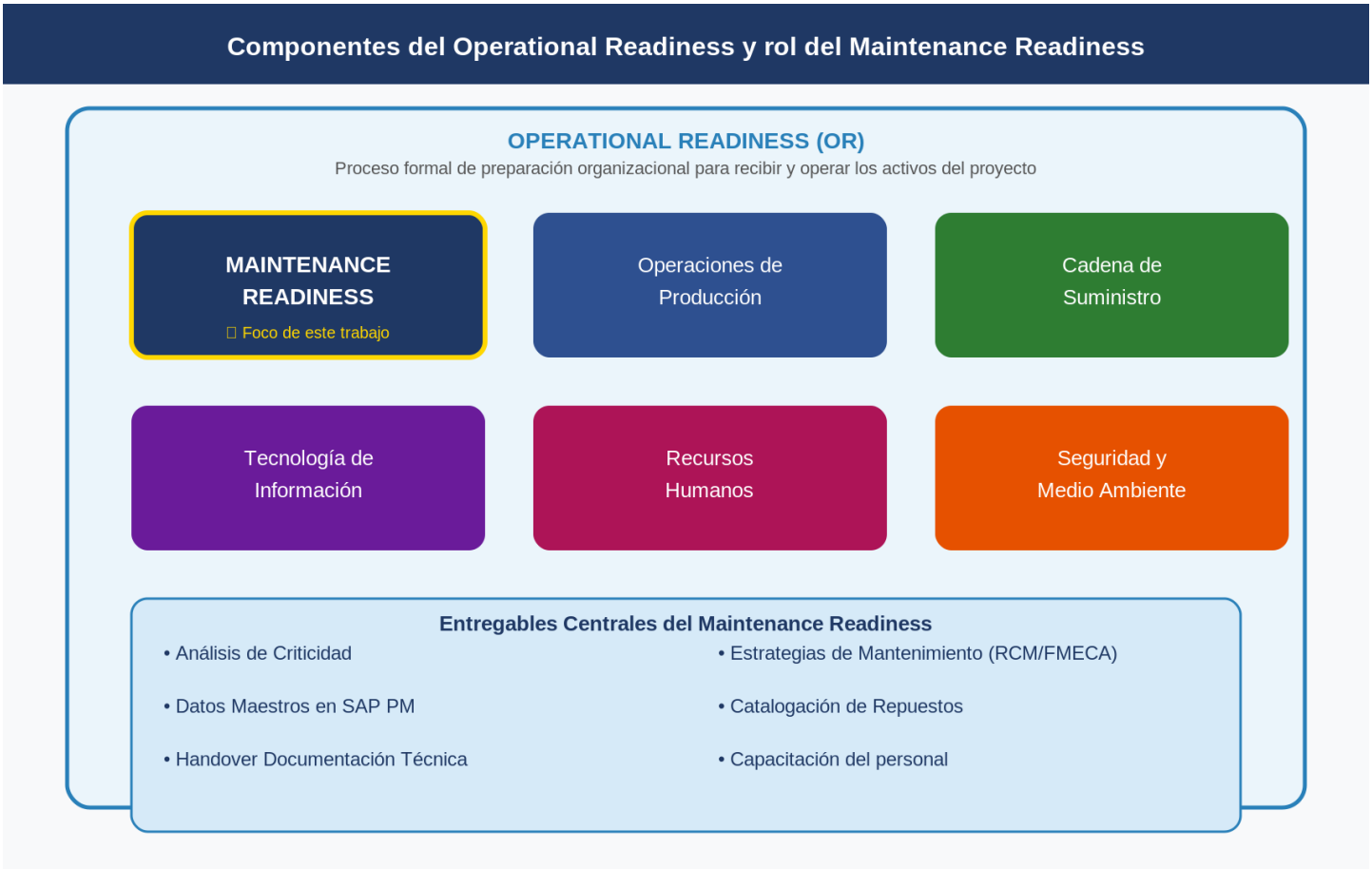

Figura 3. Componentes del Operational Readiness y rol del Maintenance Readiness

4.1.2 Operational Readiness y Maintenance Readiness

El Operational Readiness (OR), o Alistamiento Operacional, es el proceso mediante el cual una organización se prepara para recibir y operar un nuevo activo o proyecto. El marco corporativo de Anglo American lo vincula con el traspaso formal de la responsabilidad, el cuidado y el control de las instalaciones y equipos desde el equipo de proyecto hacia el de operaciones: el OR prepara a la organización para ese traspaso, que en este trabajo se denomina handover (apartado 4.1.4). Este proceso comienza tempranamente en el ciclo de proyecto y se extiende hasta el arranque y la estabilización inicial de la operación.

El OR abarca múltiples dimensiones organizacionales: operaciones de producción, mantenimiento, cadena de suministro, tecnología, recursos humanos, seguridad y medio ambiente. En este marco multidimensional, el Maintenance Readiness representa el componente específico que asegura que los sistemas, procesos y capacidades de mantenimiento estén disponibles y operativos antes del inicio de la producción. Desde la gestión de activos, el Institute of Asset Management sitúa estas actividades en el tema de creación y adquisición de activos, que comprende la planificación, la

adquisición, la instalación, el comisionamiento y el traspaso a operaciones, e incluye expresamente los arreglos para ese traspaso (IAM, 2024).

El marco normativo de Codelco emplea el término alistamiento operacional para referirse a la preparación del área de operaciones para recibir un proyecto, que incluye verificar que sus sistemas se hayan diseñado e instalado según los requisitos del dueño y que funcionen correctamente, por separado e integrados.

El estándar corporativo de BHP describe el Maintenance Readiness como una parte integral del OR, cuyo objetivo es verificar que al finalizar el proyecto los sistemas, procesos y capacidades organizacionales necesarios para mantener las nuevas instalaciones o equipos están en funcionamiento. La compañía distingue de manera explícita el alcance de mantenimiento dentro del OR respecto de los de producción, tecnología y abastecimiento.

Figura 4. Posicionamiento del Maintenance Readiness en el ciclo de proyecto

4.1.3 Comisionamiento, Puesta en Marcha y Arranque

En el contexto de proyectos mineros, el comisionamiento es el proceso técnico que verifica y prueba que los sistemas y equipos instalados funcionan de acuerdo con las especificaciones de diseño, antes de ser transferidos a operaciones. Se distingue del arranque (start-up), que corresponde al inicio de la producción, y de la puesta en marcha, término que en el contexto latinoamericano suele abarcar desde las pruebas finales de comisionamiento hasta la estabilización operacional.

Los elementos del MR que permiten mantener cada sistema deben estar disponibles antes de que ese sistema entre en comisionamiento, de modo que el equipo de mantenimiento cuente con lo necesario para gestionar los activos desde el primer día de operación. Esto incluye, como mínimo: la identificación y catalogación de repuestos críticos, la carga de datos maestros en el CMMS, la definición de estrategias y planes de mantenimiento, la disponibilidad de procedimientos, la

capacitación del personal, y el establecimiento de la estructura organizacional de mantenimiento. El traspaso a operaciones, antes del arranque, verifica que ese conjunto esté completo; su efectividad, en cambio, solo puede comprobarse con el activo en operación, por lo que en este trabajo el MR se extiende hasta un cierre diferido posterior al arranque (apartado 4.6.1).

4.1.4 Conceptos Clave del Proceso de MR

Para contextualizar el análisis comparativo, es necesario definir algunos conceptos clave del proceso de MR que son transversales a los marcos corporativos estudiados:

Análisis de Criticidad: proceso sistemático que clasifica los equipos según su impacto potencial en la seguridad, el medio ambiente, la producción y los costos de mantenimiento, permitiendo priorizar los recursos y esfuerzos de MR (definición operativa adoptada en este trabajo).

RCM (Reliability Centered Maintenance) / FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis): metodologías de ingeniería de confiabilidad utilizadas para identificar los modos de falla de los activos, sus efectos y consecuencias, y definir las tareas de mantenimiento más adecuadas para prevenir o mitigar dichas fallas (Moubray, 1997; SAE International, 1999).

Datos Maestros de Mantenimiento: conjunto de información estructurada que debe ser cargada en el CMMS (Computerized Maintenance Management System) antes del inicio de la operación, incluyendo la jerarquía de activos (ubicaciones funcionales/UTs), los objetos técnicos (equipos), las listas de materiales (BOM), las hojas de ruta de mantenimiento y los planes de mantenimiento preventivo.

Catalogación de Materiales: proceso de identificación, descripción técnica y codificación de los repuestos, consumibles e insumos necesarios para el mantenimiento, que deben estar disponibles en el almacén antes del inicio de la operación.

Handover o Transferencia de Activos: proceso formal mediante el cual el equipo de proyecto transfiere la responsabilidad sobre los activos al equipo de operaciones y mantenimiento, respaldado por documentación técnica actualizada (as-built), manuales, certificaciones, garantías y evidencia de cumplimiento de los requerimientos de MR.

4.2 Contexto: La Gran Minería del Cobre en Chile

4.2.1 Panorama de la Industria

Chile es el mayor productor de cobre del mundo, con una participación del 22,9% de la producción mundial de cobre de mina en 2025 (Cochilco, 2026). La industria minera del cobre

concentra sus operaciones principalmente en las regiones del norte del país, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, donde se ubican los yacimientos de mayor relevancia, incluyendo Chuquicamata, Escondida, Collahuasi, Los Pelambres y Spence, entre otros.

La Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) reporta que la producción nacional alcanzó 5,4 millones de toneladas métricas finas en 2025, sostenida por activos de capital que representan inversiones acumuladas de decenas de miles de millones de dólares (Cochilco, 2026). Las principales compañías productoras, Codelco, BHP, Anglo American, Antofagasta Minerals, Glencore y Freeport-McMoRan, entre otras, operan con modelos de gestión y gobernanza que varían desde corporaciones estatales hasta conglomerados internacionales privados.

En este contexto, los proyectos de inversión en la gran minería chilena son de alta complejidad técnica y requieren marcos de gestión que aseguren que los activos entren en operación en forma segura y dentro de los costos y plazos comprometidos. Los proyectos de expansión o greenfield en este sector involucran inversiones de gran escala, plazos de varios años y numerosos contratistas, lo que multiplica las interfaces que la preparación del mantenimiento debe gestionar.

4.2.2 Desafíos Específicos del MR en la Minería

Las características propias del sector minero imponen desafíos particulares al proceso de Maintenance Readiness que no siempre están presentes en otras industrias:

Aislamiento geográfico: muchas operaciones mineras se ubican en zonas remotas de alta cordillera o desierto, con condiciones climáticas extremas y acceso restringido, lo que eleva la importancia de contar con repuestos críticos correctamente dimensionados y estrategias de mantenimiento robustas desde el inicio de la operación.

Equipos de alta especialización: las plantas concentradoras, los chancadores SAG y de bolas, los sistemas de flotación, los espesadores y los equipos de manejo de materiales son activos de alta complejidad técnica con proveedores especializados, que requieren estrategias de mantenimiento específicas y personal con competencias altamente calificadas.

Presión sobre los plazos: los proyectos mineros están sujetos a presiones comerciales y regulatorias que frecuentemente llevan a comprimir los plazos de comisionamiento, afectando la disponibilidad de tiempo para completar adecuadamente las actividades de MR.

Integración con múltiples contratistas: en la fase de construcción y comisionamiento, concurren numerosas empresas contratistas que generan información técnica de los activos en distintos formatos y sistemas, lo que dificulta la consolidación de datos maestros de mantenimiento de calidad.

Figura 5. Desafíos específicos del Maintenance Readiness en proyectos de la gran minería

4.2.3 Caracterización de las Empresas Estudiadas

Las cuatro compañías objeto de este estudio representan distintos modelos organizacionales y culturas corporativas en la gestión de proyectos y activos:

Codelco (Corporación Nacional del Cobre de Chile) es la empresa estatal de cobre más grande del mundo en términos de producción y reservas. Su modelo de gestión es corporativo-centralizado, con estándares y normas que se aplican de manera uniforme en todas sus divisiones. La NCC-30 constituye su marco normativo corporativo para el componente de mantenibilidad y confiabilidad en proyectos de inversión.

BHP es una compañía australiana multinacional que opera en Chile a través de sus operaciones de Spence y Escondida. Su modelo de gestión de activos es global, con estándares corporativos definidos por su Centro de Excelencia de Mantenimiento e Ingeniería (MECoE). Sus estándares se desarrollan desde la casa matriz y se aplican con adaptaciones locales.

Anglo American opera en Chile las faenas de Los Bronces y El Soldado, y participa además en la propiedad de Collahuasi. Su enfoque de Maintenance Readiness está enmarcado en la guía AS&R (Asset Strategy and Reliability), desarrollada por su área global de Asset Strategy & Reliability, que establece un marco metodológico extenso y de amplio desarrollo temático.

Antofagasta Minerals S.A. (AMSA) es el holding minero del grupo Antofagasta, que opera las faenas Centinela, Los Pelambres, Zaldívar y Antucoya. Como compañía de origen chileno, AMSA ha desarrollado estándares propios a través de su Sistema de Entrega de Activos (ADS), con un enfoque práctico orientado a la realidad operacional de sus faenas.

4.3 Caracterización de los Requerimientos de Maintenance Readiness por Compañía

A partir de la documentación normativa interna de cada compañía, a la que el autor tuvo acceso en el ejercicio de su actividad profesional, clasificada y resguardada conforme al criterio de confidencialidad descrito en el apartado 3.5, se caracterizan a continuación los marcos de Maintenance Readiness (MR) de las cuatro compañías estudiadas. Dado el carácter interno de estos documentos, la descripción se centra en su alcance, estructura y énfasis general, evitando la reproducción de contenido textual o de identificadores específicos de los documentos fuente. El detalle de trazabilidad de cada fuente se mantiene en un registro de trabajo interno, disponible para el profesor guía si así se requiere.

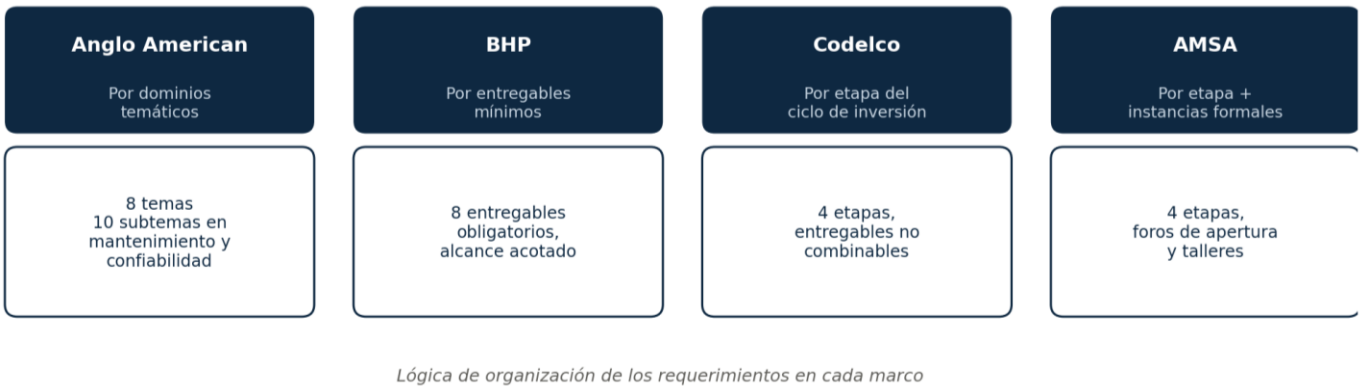

Figura 6. Lógica de organización de los requerimientos de Maintenance Readiness en cada marco

4.3.1 Anglo American

El marco de Maintenance Readiness de Anglo American (2019), conocido internamente como AS&R (Asset Strategy and Reliability), es el más extenso de los cuatro estudiados y el que presenta mayor desarrollo temático en la documentación revisada. Se estructura en torno a ocho grandes temáticas o dominios (identificados mediante un código de colores en el documento original) que cubren de manera integral el ciclo de preparación del mantenimiento: ingeniería; seguridad, salud y medio ambiente; planificación y presupuesto del MR; mantenimiento y confiabilidad; gestión de la información; repuestos y soporte; dotación y capacitación; y aspectos operacionales. El dominio de mantenimiento y confiabilidad concentra el mayor desarrollo temático, con diez subtemas que abarcan desde la definición de estrategias de activos y el análisis de confiabilidad (RCM) hasta la gestión de repuestos críticos y el manejo de fluidos. El documento posiciona explícitamente al MR como un subconjunto del Operational Readiness y lo enmarca dentro del modelo corporativo de gobernanza de proyectos de inversión de la compañía, incorporando además un extenso conjunto de anexos de apoyo

(ejemplos, plantillas y perfiles de rol). Este nivel de detalle y amplitud multidisciplinaria explica que, en el análisis comparativo del apartado 4.4, este marco obtenga los niveles más altos en amplitud temática y profundidad metodológica.

4.3.2 BHP

El estándar de BHP (2022), desarrollado por su Centro de Excelencia de Mantenimiento e Ingeniería (MECoE), adopta un enfoque opuesto en extensión: es un documento breve y de carácter normativo mínimo, que define con precisión los entregables exigibles sin profundizar en metodología. Establece ocho entregables obligatorios para todo proyecto de capital: un plan de gestión de activos alineado a la vida útil definida corporativamente; una evaluación de criticidad de equipos según metodología estandarizada; el desarrollo de estrategias de mantenimiento ajustadas al ciclo de vida de cada equipo; la catalogación de materiales y repuestos, incluyendo la identificación de equipos reparables; la preservación y embalaje de equipos reparables cuando corresponda; la carga de datos maestros de mantenimiento (que incluye trece elementos definidos, desde la estructura de materiales hasta los centros de trabajo); el control de contaminación; y la entrega de artefactos de soporte al equipo de mantenimiento (quince categorías de documentación técnica, desde manuales de fabricante hasta antecedentes de comisionamiento). El documento excluye explícitamente los requerimientos de Operational Readiness de producción, tecnología y abastecimiento, delimitando su alcance estrictamente al componente de mantenimiento. Esta precisión y acotamiento son consistentes con un modelo de gestión global que privilegia estándares mínimos aplicables de manera uniforme en todas sus operaciones.

4.3.3 Codelco

El marco normativo de Codelco (2021) corresponde a una norma corporativa (conocida internamente como NCC-30) articulada con su Sistema Operativo de Mantenimiento (SOMA) y su sistema corporativo de gestión de inversiones. Su rasgo distintivo es el nivel de formalización con que estructura los entregables: se aplica a todos los proyectos corporativos con activos mantenibles, hasta el quinto nivel de la estructura de descomposición de equipos (o el nivel de componente mantenible), acordado formalmente en la reunión de inicio del proyecto. Los requerimientos se organizan de manera estricta según las cuatro etapas del ciclo de inversión de la compañía (perfil, prefactibilidad, factibilidad y ejecución), cada una con objetivo, entregables y responsable explícitamente definidos. Una regla metodológica particularmente relevante para este trabajo es la exigencia de que cada entregable se desarrolle de forma independiente, sin combinarse con otros, con el fin explícito de facilitar su trazabilidad. El marco incorpora además un mecanismo de flexibilidad según la complejidad del

proyecto, que permite omitir ciertos entregables en proyectos de menor envergadura bajo condiciones definidas, y anexos extensos con detalle de roles, entregables por etapa y requisitos de entrada y salida para los hitos de control del proyecto.

4.3.4 AMSA

La documentación de AMSA que regula la entrega de proyectos al área de mantenimiento corresponde al desarrollo específico para mantenimiento del enfoque corporativo de entrega de activos de la compañía (conocido internamente como ADS), y comparte con el marco de Codelco la lógica de organizarse según las mismas cuatro etapas del ciclo de inversión. Su rasgo distintivo es el énfasis en la gobernanza del proceso: cada etapa contempla una instancia formal de apertura, vinculada al avance de la ingeniería, en la que se ratifican roles y se acuerda el calendario de trabajo, y talleres de validación para revisar los entregables desarrollados. Cada etapa define además una matriz de responsabilidades (RACI) que especifica el nivel de participación de los distintos roles de proyecto y mantenimiento. Los entregables se estructuran como análisis técnicos discretos (identificación de equipos e infraestructura crítica, estimación de disponibilidad, entre otros) que se consolidan en un informe por etapa, cada uno remitiendo a procedimientos internos propios de la compañía para su desarrollo metodológico.

Pese a compartir elementos estructurales comunes (el análisis de criticidad, la definición de estrategias de mantenimiento, la carga de datos maestros, la catalogación de materiales y el traspaso formal de la responsabilidad hacia operaciones), los cuatro marcos difieren de manera significativa en su nivel de formalización, su alcance temático y sus mecanismos de gobernanza. Estas diferencias, junto con el nivel de desarrollo documental que se deriva de esta caracterización, se examinan de manera sistemática en el apartado 4.4, mediante herramientas comparativas de visualización.

Tabla 3. Síntesis de los marcos de Maintenance Readiness por compañía

Compañía	Marco / enfoque	Estructuración principal	Rasgo distintivo
Anglo American	AS&R (Asset Strategy and Reliability)	8 temáticas multidisciplinarias; mantenimiento y confiabilidad con 10 subtemas	Mayor amplitud temática documentada
BHP	Estándar corporativo (MECoE)	8 entregables mínimos obligatorios	Precisión y acotamiento del alcance
Codelco	Norma corporativa (NCC-30 / SOMA)	4 etapas del ciclo de inversión; entregables no combinables	Mayor formalización y trazabilidad
AMSA	Requisitos de entrega a mantenimiento (marco ADS)	4 etapas del ciclo de inversión; foros y talleres de validación	Énfasis en gobernanza, roles y sistemas

4.4 Análisis Comparativo

Una vez caracterizados individualmente los marcos de Maintenance Readiness de Anglo American, BHP, Codelco y AMSA, corresponde contrastarlos de forma sistemática para identificar patrones, divergencias y diferencias en el nivel de desarrollo documental. El análisis se apoya en dos herramientas visuales complementarias: un gráfico de radar que compara los cuatro marcos en seis dimensiones transversales (amplitud temática, formalización de entregables, gobernanza, profundidad metodológica, orientación a sistemas de información y trazabilidad documental), y un mapa de cobertura que evalúa la presencia de ocho componentes típicos de MR en cada marco, sintetizando así las diferencias descritas cualitativamente en la sección anterior.

Las valoraciones de ambas herramientas se asignaron con la escala y los anclajes definidos en el apartado 3.6, a partir de la caracterización de la sección 4.3, y cada una queda respaldada en el registro interno de trazabilidad. No constituyen una medición auditada ni certificada por las compañías.

Conviene precisar el alcance de esta comparación. Lo que se compara es el contenido de los documentos normativos revisados y no el desempeño ni la práctica efectiva de mantenimiento de cada compañía. Un nivel bajo indica que un elemento no está desarrollado en el documento analizado, lo que no implica que la compañía no lo ejecute por otras vías. Del mismo modo, las expresiones referidas a un mayor o menor desarrollo deben entenderse respecto de las seis dimensiones y de la documentación disponible, y no como una evaluación integral de la gestión de activos de cada organización. Bajo esta precisión se interpreta también la noción de madurez del objetivo específico OE2: como el nivel de desarrollo documental que cada marco alcanza en las dimensiones analizadas.

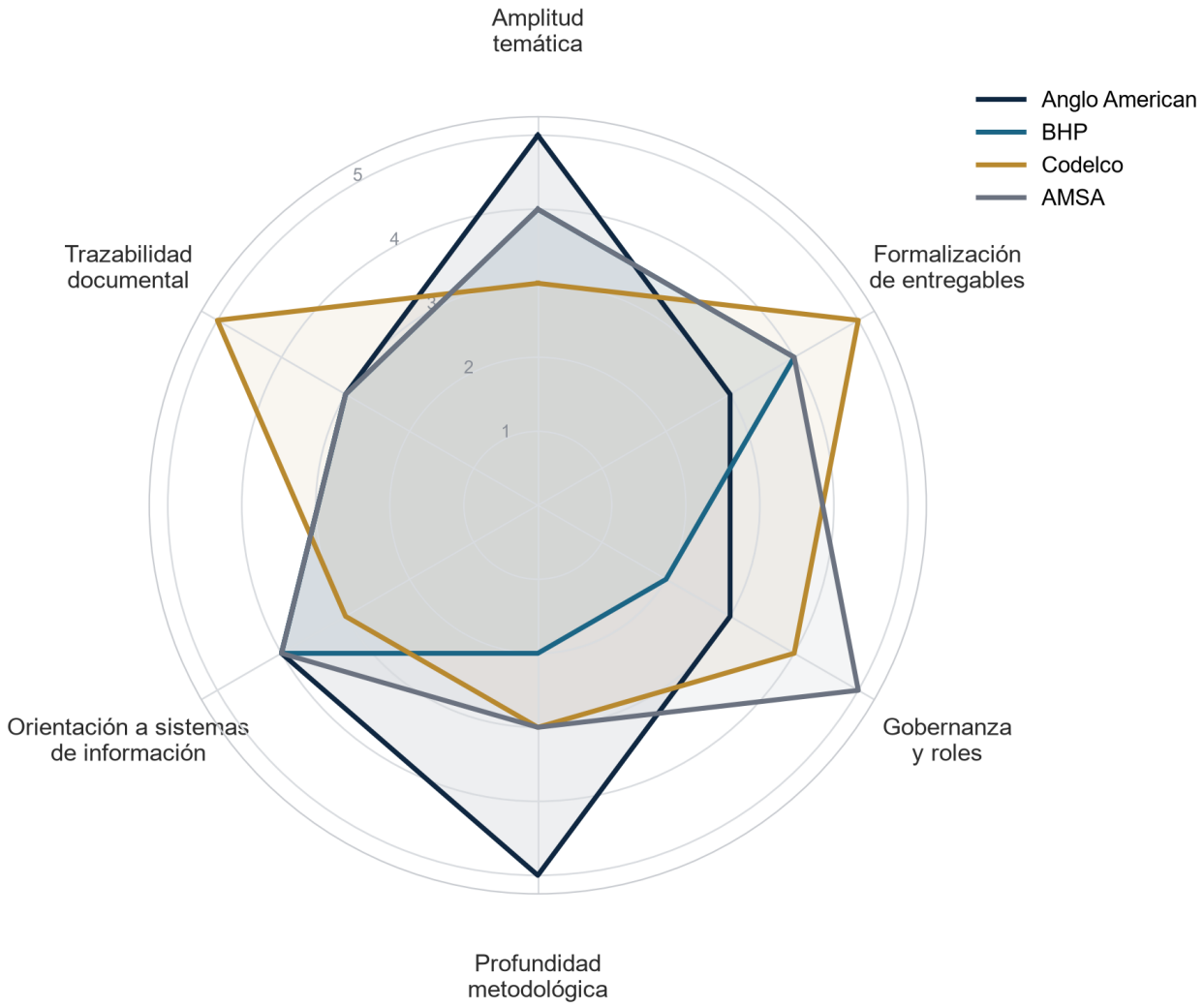

Figura 7. Nivel de desarrollo documental por dimensión en los cuatro marcos de Maintenance Readiness

El área de cada polígono del gráfico no representa un puntaje agregado: el gráfico se lee por dimensión. El mapa de cobertura que se presenta a continuación complementa esta lectura agregando el nivel de detalle por componente específico, evidenciando qué elementos de Maintenance Readiness reciben mayor desarrollo documental en cada compañía y cuáles quedan definidos de manera más general.

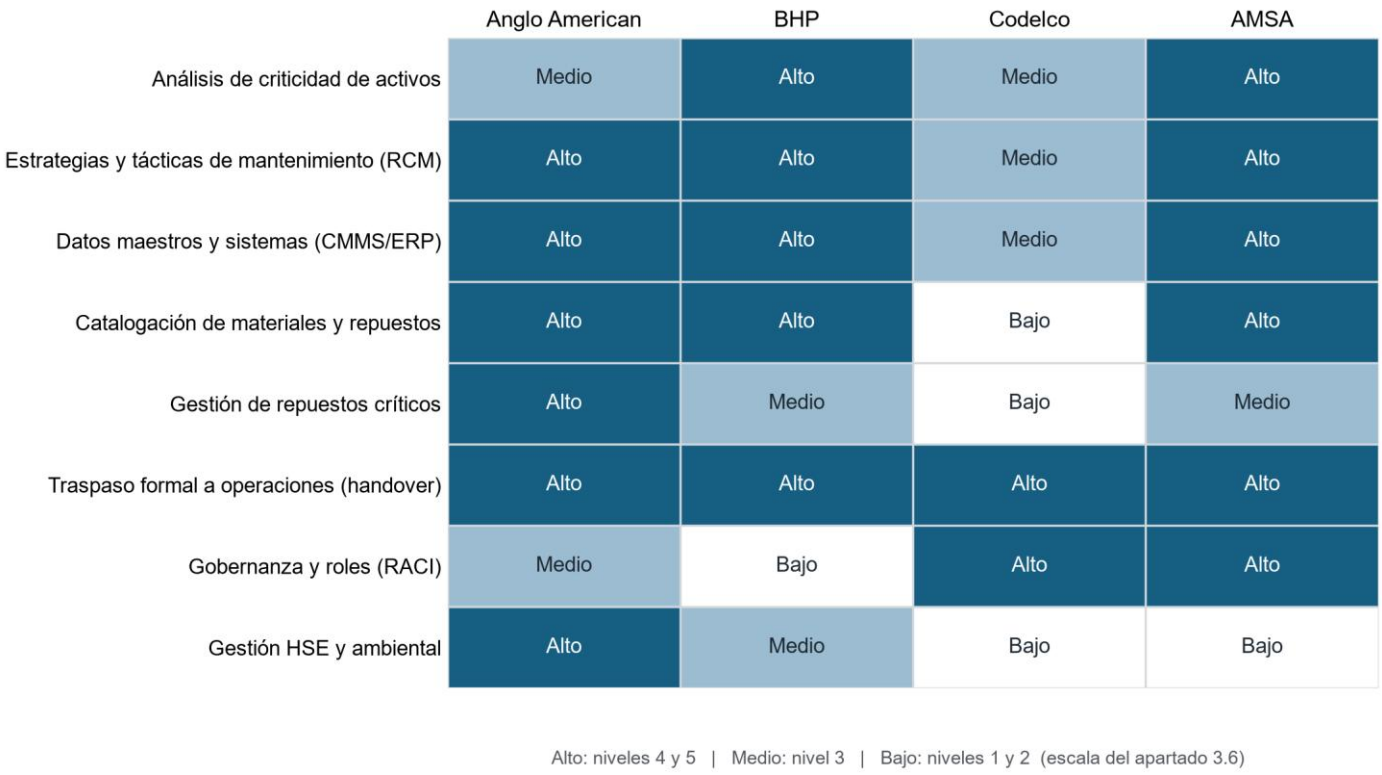

Figura 8. Mapa de cobertura de componentes de Maintenance Readiness por compañía

El contraste entre ambas visualizaciones muestra que ningún marco obtiene las valoraciones más altas en todas las dimensiones, sino que cada documento desarrolla con mayor detalle un eje distinto del Maintenance Readiness. El marco de Anglo American alcanza los niveles más altos en profundidad metodológica y amplitud temática, con un desarrollo extenso del análisis de confiabilidad y de las estrategias de mantenimiento. El de Codelco obtiene las valoraciones más altas en formalización de entregables y trazabilidad documental, consistente con su organización por etapas del ciclo de inversión. El de AMSA se distingue en gobernanza y roles, apoyado en instancias formales de coordinación entre proyecto y operación. El de BHP cubre la mayoría de los componentes con requisitos mínimos precisos y una clara orientación a los sistemas de información, pero con baja profundidad metodológica y sin un modelo explícito de roles. Estas diferencias reflejan el propósito y la naturaleza de cada documento y no constituyen un orden de mérito entre compañías; sobre esta base se abordan, en el apartado siguiente, los factores críticos de éxito y las brechas documentales comunes.

4.5 Factores Críticos de Éxito, Brechas y Buenas Prácticas

La comparación desarrollada en 4.3 y 4.4 permite ir más allá de la descripción de cada marco individual y extraer conclusiones transversales sobre qué condiciones favorecen un proceso de

Maintenance Readiness efectivo, qué vacíos persisten incluso en los marcos más desarrollados, y qué prácticas concretas resultan replicables fuera de su contexto de origen. Esta síntesis se organiza en tres dimensiones complementarias: los factores críticos de éxito observados en los cuatro marcos, un catálogo de brechas documentales comunes que ninguno de ellos resuelve completamente, y un conjunto de buenas prácticas que sirven de insumo directo para la propuesta metodológica desarrollada en el apartado 4.6.

4.5.1 Factores Críticos de Éxito

El análisis conjunto de los cuatro marcos permite identificar un grupo de condiciones que establecen los documentos más desarrollados y que habilitan un proceso de Maintenance Readiness ordenado y verificable. Son factores observados en los documentos: el estudio no dispone de datos de desempeño de proyectos que permitan medir su efecto en el resultado del MR. Su respaldo proviene del caso del apartado 4.7, donde la ausencia de varios de ellos coincidió con las dificultades observadas, y de su correspondencia con los factores críticos de éxito que el Construction Industry Institute identificó para el comisionamiento y la puesta en marcha (CII, 2015), que se analiza en el apartado 4.8. Cinco de ellos resultan especialmente relevantes para la propuesta metodológica:

- Formalización temprana de los entregables por etapa del proyecto, presente con distinto grado de rigor en Codelco y AMSA, que busca evitar que el alistamiento de mantenimiento se resuelva de manera improvisada hacia el final de la puesta en marcha.
- Gobernanza explícita, con roles, responsabilidades e instancias formales de coordinación entre el equipo de proyecto y el de operación, factor especialmente desarrollado en AMSA y, en menor medida, en Codelco.
- Profundidad técnica en confiabilidad y estrategias de mantenimiento, donde Anglo American se distingue por integrar herramientas de análisis más exigentes.
- Orientación temprana hacia los sistemas de información y los datos maestros, común a Anglo American, BHP y AMSA, que busca reducir el riesgo de que el CMMS quede subutilizado al momento del arranque.
- Precisión y acotamiento del alcance, característica distintiva de BHP, que facilita que los requisitos sean efectivamente verificables antes del cierre del proyecto.

4.5.2 Brechas Documentales Identificadas

A partir de la misma comparación, y aplicando la regla de decisión del apartado 3.6, se identificaron diez brechas documentales. Su denominación es deliberada: corresponden a elementos que no están desarrollados en los documentos normativos revisados, lo que no significa

necesariamente que la compañía no los ejecute en la práctica, ya que puede abordarlos mediante procedimientos complementarios o prácticas de terreno no incluidas en la revisión. Lo que sí indica una brecha documental es que la ejecución de ese elemento no queda asegurada por el marco corporativo y depende, por lo tanto, del criterio de cada equipo de proyecto, que es precisamente la variabilidad que la propuesta metodológica busca reducir. La Tabla 4 presenta cada brecha con el referente que la hace exigible, los marcos en que el elemento obtiene nivel 1 o 2 y su implicancia práctica, y la Figura 9 muestra el nivel asignado en cada marco.

Tabla 4. Catálogo de brechas documentales identificadas en los marcos de Maintenance Readiness

Código	Brecha documental	Referente que la hace exigible (C1)	Marcos con nivel 1 o 2 (C2)	Implicancia (C3)
B1	Sin criterios explícitos para verificar la efectividad del MR antes del cierre	ISO 55001:2024, cláusulas 9.1 y 9.2	Los cuatro	No hay forma sistemática de comprobar que el MR quedó operativo
B2	Gestión de repuestos críticos poco desarrollada	Anglo American (nivel 5)	Codelco	Riesgo de indisponibilidad de materiales al arranque
B3	Gobernanza y roles poco explícitos	ISO 55001:2024, cláusula 5.3; AMSA (nivel 5)	BHP	Ambigüedad sobre quién responde por cada entregable
B4	Gestión HSE y ambiental cubierta de forma parcial	ISO 55001:2024, cláusula 6.1; Anglo American (nivel 5)	Codelco, AMSA	Riesgos operacionales no siempre anticipados en el MR
B5	Sin indicadores cuantitativos de avance o calidad del MR	ISO 55001:2024, cláusula 9.1	Los cuatro	Dificulta el seguimiento objetivo del proceso
B6	Requisitos sin guía metodológica de aplicación	Anglo American (nivel 5)	BHP	La calidad de los entregables depende del criterio de cada equipo o contratista
B7	Débil articulación explícita con el sistema de gestión de activos	ISO 55001:2024, cláusulas 4.4 y 6.2	Anglo American, Codelco, AMSA	El MR queda desconectado de los objetivos de gestión de activos
B8	Sin escalamiento de exigencias según la complejidad del proyecto	Codelco (nivel 4)	Anglo American, BHP, AMSA	Sobrecarga en proyectos menores o exigencia insuficiente en proyectos complejos
B9	Momento de ingreso de mantenimiento poco definido	AMSA (nivel 5); LeBlanc (2014)	Anglo American, BHP	Riesgo de participación tardía en la ingeniería

Código	Brecha documental	Referente que la hace exigible (C1)	Marcos con nivel 1 o 2 (C2)	Implicancia (C3)
B10	Sin mecanismo de retroalimentación posterior al arranque	ISO 55001:2024, cláusula 10.1	Los cuatro	Las lecciones aprendidas no retroalimentan el MR

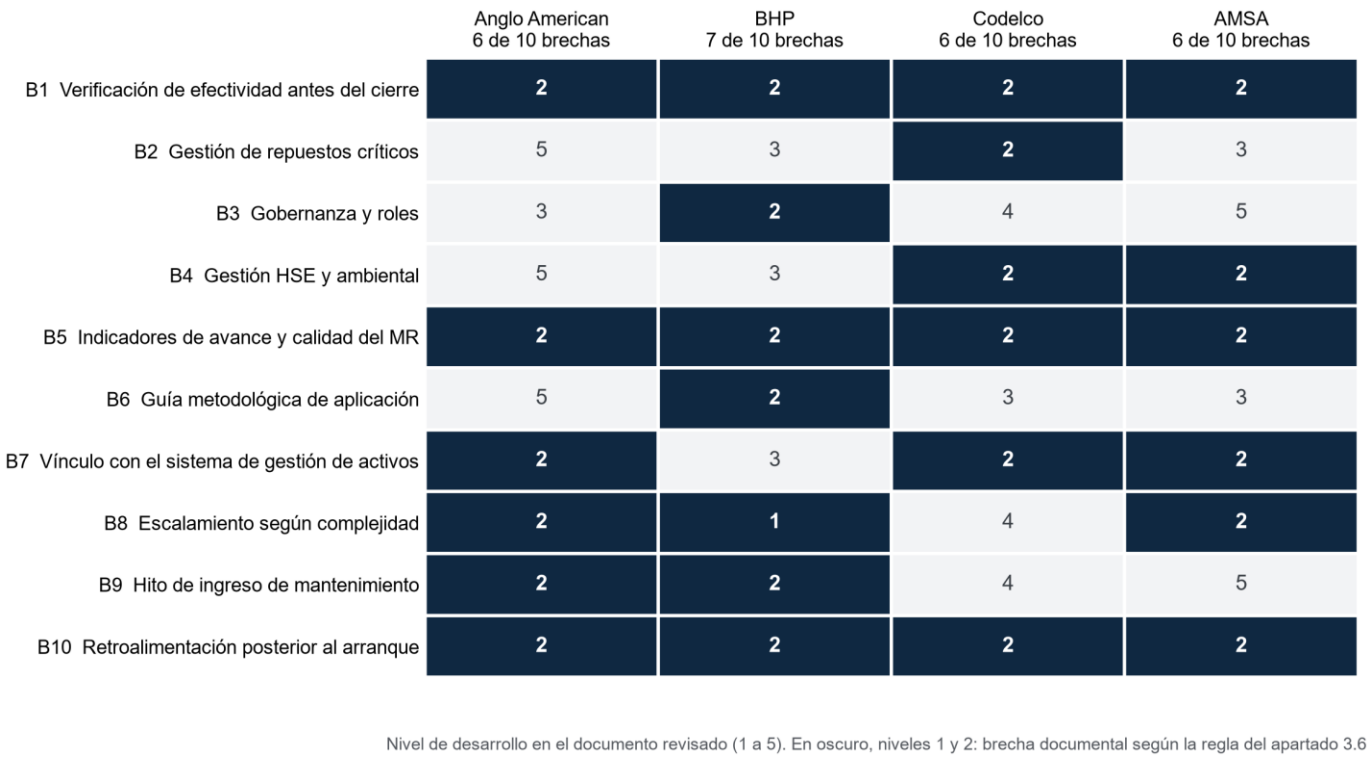

Figura 9. Nivel de desarrollo de los elementos asociados a cada brecha documental en los cuatro marcos

4.5.3 Buenas Prácticas Transferibles

Más allá de sus limitaciones particulares, cada marco aporta al menos una práctica que resulta transferible al diseño de una metodología de aplicación general. De Codelco se rescatan la exigencia de entregables no combinables entre sí, que impide que un documento genérico sustituya el desarrollo específico de cada componente del MR, y su mecanismo de ajuste de exigencias según la complejidad del proyecto, que la propuesta generaliza en el apartado 4.6.2. De AMSA se recoge el uso de instancias formales de apertura y talleres de validación, que anclan la participación de mantenimiento a hitos concretos de avance de la ingeniería y no a decisiones informales. De Anglo American se toma la agrupación de requisitos en dominios temáticos identificables, que facilita su comunicación a equipos multidisciplinarios. De BHP se rescata la brevedad y precisión de los requisitos mínimos, que reduce la ambigüedad al momento de verificar su cumplimiento. Combinadas, estas prácticas dan forma a las cinco etapas y a los mecanismos de gobernanza que se desarrollan a continuación.

4.6 Propuesta Metodológica para la Gestión de Maintenance Readiness

A partir de los factores críticos de éxito, las brechas identificadas y las buenas prácticas descritas en el apartado anterior, se desarrolla en esta sección la propuesta metodológica central de este trabajo. El objetivo es ofrecer un esquema de aplicación general para el proceso de Maintenance Readiness en proyectos de la gran minería del cobre, que pueda adaptarse tanto a operaciones con marcos corporativos ya consolidados como a compañías que están definiendo su propio estándar. La propuesta se estructura en cinco etapas secuenciales, incorpora un mecanismo de escalamiento según la complejidad del proyecto, un modelo de gobernanza con roles definidos, un sistema de indicadores con un tablero de preparación para el traspaso, la vinculación de cada etapa con la gestión de activos, una tabla de trazabilidad que vincula cada brecha detectada con el mecanismo metodológico que la resuelve, y un conjunto explícito de criterios para su validación.

4.6.1 Estructura General de la Propuesta

La propuesta organiza el proceso de Maintenance Readiness en cinco etapas secuenciales, cada una con un criterio de salida formal que debe cumplirse antes de avanzar a la siguiente, siguiendo la lógica de entregables no combinables observada en Codelco y de instancias de apertura formal observada en AMSA. Las cinco etapas son: planificación y gobernanza del MR, caracterización técnica de activos, definición de estrategias y tácticas de mantenimiento, habilitación de sistemas e información, y verificación y cierre del MR. Esta secuencia no impide el trabajo en paralelo entre etapas contiguas cuando el cronograma del proyecto lo permite, pero exige que cada gate se documente formalmente antes de dar por cumplida la etapa correspondiente. La quinta etapa se cierra en dos momentos: el traspaso formal a operaciones, antes del arranque, y un cierre diferido, a los 90 días de operación en los proyectos de nivel II y III y a los 30 días en los de nivel I (apartado 4.6.2), en el que se miden los indicadores de resultado y se registran las lecciones aprendidas, con un taller formal en los proyectos de nivel III. Este segundo momento responde a una brecha común a los cuatro marcos (B10), que no prevén un mecanismo de retroalimentación posterior al arranque. La Figura 10 sitúa las cinco etapas y sus gates dentro del ciclo de inversión, junto con el ingreso de mantenimiento recomendado y el observado en el caso del apartado 4.7.

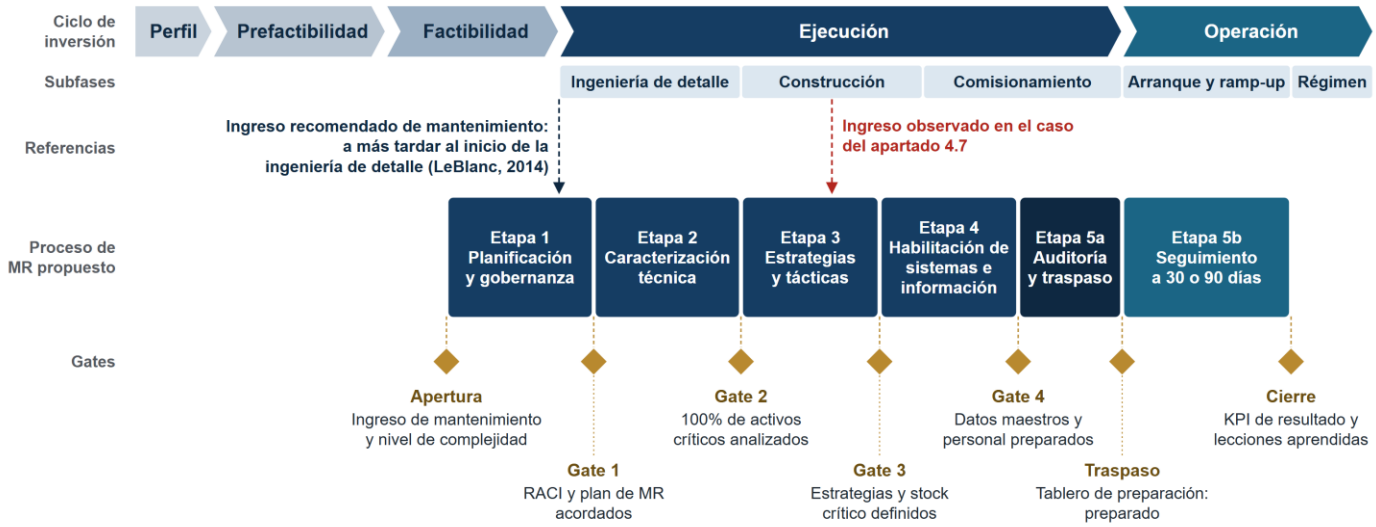

Figura 10. Integración de las etapas del Maintenance Readiness al ciclo de inversión, con sus gates y criterios de salida

La Tabla 5 resume el objetivo, las actividades esenciales, el responsable principal y las herramientas o mecanismos clave asociados a cada una de las cinco etapas.

Tabla 5. Etapas de la propuesta metodológica: objetivo, actividades, responsables y herramientas

Etapa	Objetivo	Actividades esenciales	Responsable	Herramientas
1. Planificación y gobernanza	Formalizar el inicio y la gobernanza del MR	Gate de apertura; clasificación de complejidad; RACI; alineación con el plan estratégico de gestión de activos	Líder MR / Patrocinador	Matriz de complejidad, RACI, acta de apertura
2. Caracterización técnica de activos	Identificar y caracterizar activos hasta nivel mantenible	Levantamiento de equipos; análisis de criticidad; variables HSE	Mtto Proyecto (equipo multidisciplinario)	Estructura de descomposición, matriz de criticidad
3. Estrategias y tácticas de mantenimiento	Definir estrategias y asegurar repuestos críticos	RCM/FMECA; procedimientos con controles de seguridad; catalogación de materiales; stock crítico	Mtto Proyecto (equipo multidisciplinario)	RCM/FMECA, catálogo, plan de repuestos
4. Habilitación de sistemas e información	Configurar sistemas, cargar datos maestros y preparar al personal	Carga de datos maestros; configuración de flujos; artefactos de soporte y entregables de proveedores; plan de capacitación; control de los cambios de equipos durante el comisionamiento	Mtto Proyecto (equipo multidisciplinario)	CMMS/ERP, plantillas de datos maestros, plan de capacitación
5. Verificación y cierre del MR	Verificar cumplimiento, traspasar a operaciones y confirmar el desempeño inicial	Auditoría de cierre; aceptación del traspaso; seguimiento a 30 o 90 días; lecciones aprendidas	Líder MR / Mtto Operación	Checklist de cierre, acta de traspaso, tablero de preparación, KPI de resultado

4.6.2 Escalamiento según la Complejidad del Proyecto

No todos los proyectos requieren el mismo nivel de exigencia. Aplicar el conjunto completo de entregables a una intervención menor genera una carga administrativa que no se justifica, mientras que simplificarlo en un proyecto de gran envergadura expone a la operación a riesgos que el Maintenance Readiness debió anticipar. Entre los marcos estudiados, solo el de Codelco contempla

un mecanismo explícito de ajuste según la complejidad del proyecto, ausencia que en los otros tres se registró como la brecha B8. La propuesta generaliza esa práctica en una matriz de escalamiento de dos pasos: primero se clasifica el proyecto según los tres criterios de la Tabla 6, y luego el nivel resultante determina qué entregables, controles y condiciones son obligatorios, cuáles se aplican de forma simplificada y cuáles son opcionales.

Tabla 6. Criterios de clasificación del proyecto para el escalamiento del Maintenance Readiness

Criterio	1 punto	2 puntos	3 puntos
Tamaño (equipos mantenibles nuevos o modificados que ingresan al CMMS)	Hasta 50	Entre 51 y 500	Más de 500
Criticidad (consecuencia de falla de los activos incorporados)	Sin activos de criticidad alta	Activos críticos con respaldo o redundancia	Activos críticos sin redundancia o con riesgo HSE alto
Complejidad de la ejecución	Brownfield con tecnología conocida y un solo ejecutor	Brownfield con tecnología nueva para la operación o varios contratistas	Greenfield, o proyecto con múltiples paquetes, interfaces y contratistas

La suma de los tres puntajes, entre 3 y 9, define el nivel del proyecto: nivel I (3 o 4 puntos), nivel II (5 a 7) o nivel III (8 o 9). Para que un proyecto pequeño pero crítico no quede subestimado, se agrega una regla de resguardo: cuando el criterio de criticidad obtiene 3 puntos, el proyecto se clasifica al menos en nivel II, cualquiera sea su puntaje total. Los umbrales son una propuesta del autor, construida a partir de su experiencia en proyectos de Maintenance Readiness, y deberán calibrarse con la aplicación de la metodología. La Tabla 7 muestra las exigencias que corresponden a cada nivel.

Tabla 7. Exigencias del Maintenance Readiness según el nivel de complejidad del proyecto

Entregable, control o condición	Nivel I	Nivel II	Nivel III
Gate de apertura y matriz RACI	Acta simplificada	Obligatorio	Obligatorio
Líder de MR	Rol compartido con otra función	Dedicación parcial	Dedicación exclusiva
Análisis de criticidad	Lista de equipos críticos	Matriz completa	Matriz completa con taller de validación
Estrategias de mantenimiento	Planes del fabricante ajustados al contexto	RCM o FMECA para activos críticos	RCM o FMECA para activos críticos y semicríticos
Repuestos críticos	Identificación y código	Catalogación y plan de stock crítico	Catalogación, plan de stock y simulación de demanda
Datos maestros en el CMMS	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio

Entregable, control o condición	Nivel I	Nivel II	Nivel III
Capacitación del personal	Inducción del fabricante	Plan formal con registro de asistencia	Plan formal con evaluación o certificación
Indicadores	Tablero de preparación	Tablero e indicadores de avance	Sistema completo de 13 indicadores
Auditoría de cierre	Lista de verificación	Auditoría interna	Auditoría independiente del equipo de proyecto
Seguimiento posterior al arranque	30 días	90 días	90 días con taller de lecciones aprendidas

Los datos maestros son obligatorios en los tres niveles porque, sin ellos, el activo no puede gestionarse en el CMMS desde el primer día de operación, cualquiera sea el tamaño del proyecto.

La Figura 11 sintetiza ambos pasos: la clasificación del proyecto y el carácter acumulativo de las exigencias.

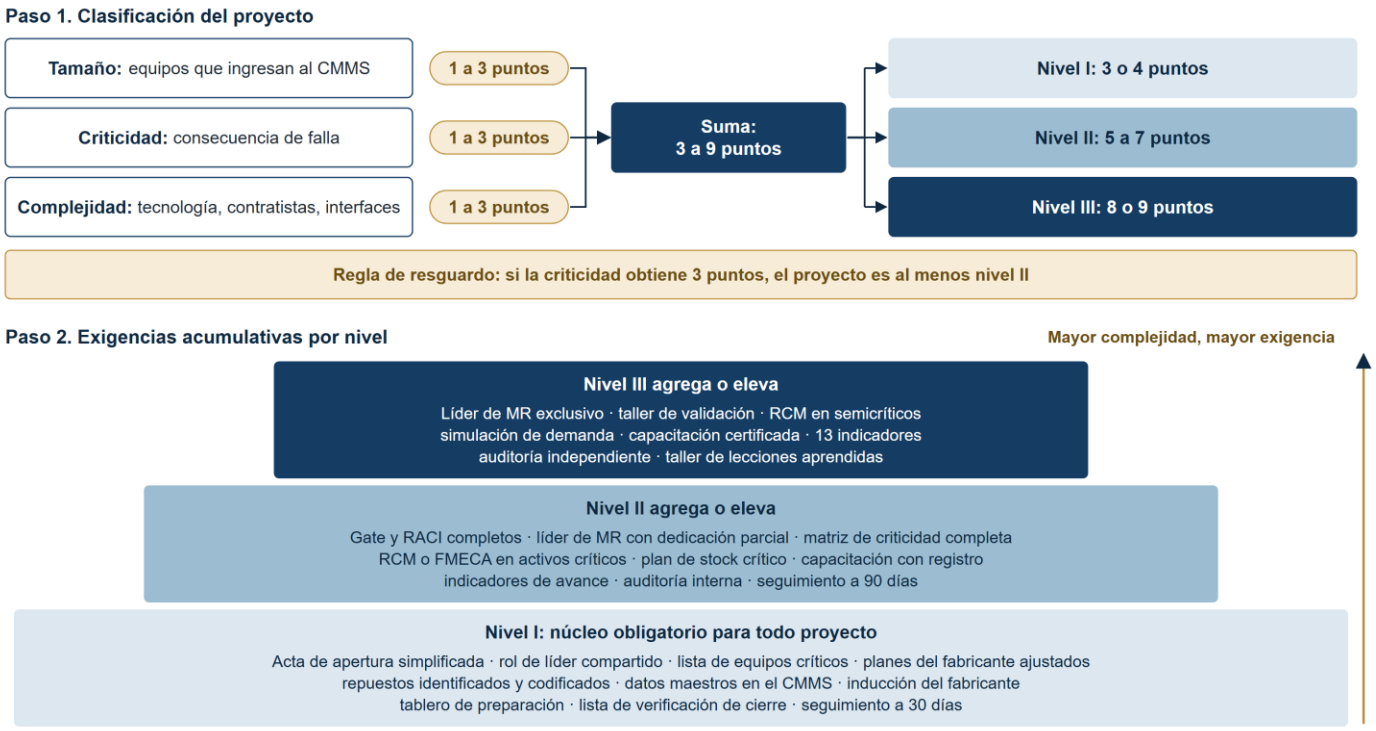

Figura 11. Clasificación del proyecto y exigencias acumulativas del Maintenance Readiness según su nivel de complejidad

4.6.3 Modelo de Gobernanza

La ausencia de roles explícitos, observada como brecha B3 en BHP, deja abierta la pregunta de quién aprueba cada entregable, lo que puede aumentar la ambigüedad y demorar la resolución de observaciones. Para evitarlo, la propuesta define cinco roles permanentes que se mantienen a lo largo

de las cinco etapas, de modo que cada actividad tenga siempre un responsable identificable y una instancia de escalamiento definida:

- Patrocinador del proyecto: habilita los recursos, resuelve escalamientos y aprueba los gates de apertura y de traspaso; los gates intermedios los aprueba el responsable de mantenimiento del proyecto, con la revisión del área receptora.
- Líder de Maintenance Readiness: coordina el proceso a lo largo de todas las etapas y consolida el seguimiento de los indicadores.
- Responsable de mantenimiento por parte del proyecto: responde por el desarrollo técnico de los entregables comprometidos.
- Responsable de mantenimiento por parte de la operación: valida la pertinencia operacional de cada entregable, participa en todas sus revisiones y firma la aceptación del traspaso, en representación del área que recibirá el activo.
- Equipo multidisciplinario: ejecuta las actividades técnicas de cada etapa, integrando confiabilidad, planificación, materiales y sistemas de información.

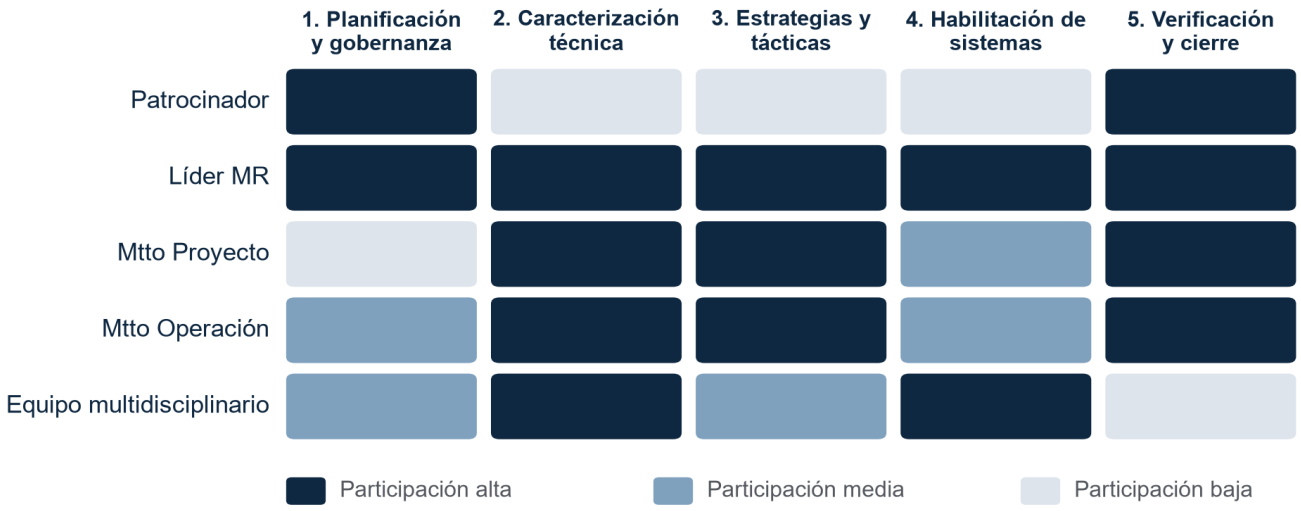

Figura 12. Nivel de participación de cada rol a lo largo de las cinco etapas de la propuesta

La Tabla 8 presenta la matriz de responsabilidades asociada a las principales actividades del proceso.

Tabla 8. Matriz de responsabilidades (RACI) del proceso de Maintenance Readiness

Actividad	Patrocinador	Líder MR	Mtto Proyecto	Mtto Operación	Equipo
Gate de apertura y clasificación de complejidad	A	R	C	C	I
Análisis de criticidad	I	C	A	C	R
Definición de estrategias de mantenimiento	I	C	A	C	R
Catalogación y repuestos críticos	I	C	A	C	R
Carga de datos maestros	I	C	A	C	R
Capacitación del personal de mantenimiento	I	A	C	R	C
Auditoría de cierre y aceptación del traspaso	A	R	C	R	I

Dos reglas complementan la matriz. La primera es que ningún entregable se considera aprobado sin una revisión en la que participe el responsable de mantenimiento de la operación: la aprobación por vencimiento de plazo, habitual en los contratos de servicios, puede resolver el avance contractual, pero no reemplaza la validación de quien operará y mantendrá el activo. La segunda es que la aceptación del traspaso la firma esa misma área, y no solo el equipo de proyecto, de modo que el cierre refleje la conformidad del receptor. Ambas reglas responden a dificultades observadas en la práctica, que se analizan en el caso de aplicación del apartado 4.7.

4.6.4 Sistema de Indicadores y Tablero de Preparación

La brecha B5, la ausencia de indicadores cuantitativos de avance o calidad del proceso de Maintenance Readiness, es una de las más transversales entre los cuatro marcos estudiados. La propuesta incorpora un sistema de trece indicadores organizados en tres categorías: indicadores de avance, que miden el cumplimiento del cronograma y de los entregables por etapa; indicadores de calidad, que miden la calidad de los entregables, la seguridad de los procedimientos y el cumplimiento de los proveedores; e indicadores de resultado, que evalúan el desempeño real de los activos durante los primeros meses de operación. La Tabla 9 detalla cada indicador junto con su fórmula de cálculo, su meta y el origen de esa meta. El origen distingue los valores que se desprenden de una condición de cumplimiento de la propia metodología, de los marcos estudiados o de los contratos (A), los que provienen de la experiencia profesional del autor en servicios de Maintenance Readiness (B) y los que

constituyen una propuesta inicial que deberá calibrarse durante la implementación (C), para no presentar como referencias de la industria valores que no lo son. Dos de los indicadores cubren aspectos que suelen quedar desatendidos en el traspaso: la seguridad de las tareas de mantenimiento desde el primer día, asociada a la brecha B4, y el cumplimiento de las obligaciones contractuales de los proveedores, cuya falta puede traducirse en repuestos sin codificar y capacitaciones no realizadas, como se observa en el caso del apartado 4.7.

Tabla 9. Sistema de indicadores de avance, calidad y resultado del proceso de Maintenance Readiness

Categoría	Indicador	Fórmula	Meta	Origen
Avance	% entregables MR completados por etapa	Aprobados / Planificados	100% antes del gate	A
Avance	% gates cerrados en la fecha planificada	Gates en fecha / Gates planificados	Mayor a 90%	C
Avance	Tiempo de revisión de entregables por el área receptora	Días hábiles entre la emisión y la aprobación	7 días hábiles o menos	A
Avance	% acciones correctivas cerradas en plazo	Cerradas en plazo / Abiertas	Mayor a 85%	C
Calidad	% entregables aprobados sin observaciones	Sin observaciones / Revisados	Mayor a 80%	B
Calidad	% datos maestros con error o incompletos	Con error o faltantes / Requeridos	Menor a 5%	B
Calidad	% repuestos críticos catalogados y disponibles	Disponibles / Críticos identificados	100% antes del arranque	A
Calidad	% activos críticos con análisis completado	Con análisis / Críticos identificados	100% antes de cerrar la etapa 2	A
Calidad	% procedimientos de mantenimiento críticos con controles de seguridad validados (análisis de riesgo de la tarea y aislamiento de energías, LOTO)	Validados / Requeridos	100% antes del arranque	A
Calidad	% entregables contractuales de proveedores recibidos y validados (manuales, hojas de datos, repuestos recomendados, capacitaciones y garantías)	Recibidos y validados / Comprometidos en contrato	100% para equipos críticos antes del traspaso	A
Resultado	Disponibilidad alcanzada en los primeros 90 días	Disponibilidad operacional real / Disponibilidad de diseño	Mayor a 90% del diseño	C

Categoría	Indicador	Fórmula	Meta	Origen
Resultado	Fallas e incidentes atribuibles a brechas de MR	N.° de fallas e incidentes con causa raíz en el MR	Cero fallas críticas y cero incidentes con lesión en tareas de mantenimiento	C
Resultado	% personal capacitado antes del arranque	Capacitado según su nivel / Dotación planificada	100% antes del traspaso	A

Tres definiciones completan la tabla. La disponibilidad de los primeros 90 días corresponde a la disponibilidad operacional de los activos críticos, que, a diferencia de la disponibilidad inherente, incluye los tiempos de espera por repuestos, personal o información, justamente los que el MR busca reducir, y se compara con la disponibilidad de diseño. Una falla o un incidente se atribuye a una brecha de MR cuando su análisis de causa raíz identifica como causa un entregable ausente o deficiente, como un repuesto no disponible, un plan inexistente o un procedimiento sin controles, y se considera crítica la falla de un activo clasificado como crítico en la etapa 2. El personal capacitado es el que cuenta con la inducción del fabricante en los proyectos de nivel I, con registro de asistencia en los de nivel II y con evaluación o certificación en los de nivel III, según la Tabla 7.

El sistema de trece indicadores está pensado para gestionar el proceso a lo largo de las cinco etapas. Para la decisión de traspaso, sin embargo, se requiere una lectura más rápida. La Tabla 10 reúne seis indicadores de estado, es decir, que miden si el activo está preparado y no cómo avanza el proceso, en un tablero con semáforo. El proyecto se declara preparado para el traspaso cuando los seis indicadores están en verde; preparado con condiciones cuando ninguno está en rojo y hasta dos están en amarillo, con un plan de cierre aprobado por el patrocinador; y no preparado cuando al menos uno está en rojo o más de dos están en amarillo. Un indicador que no se ha medido se trata como rojo, porque el tablero debe demostrar la preparación y no suponerla. En el indicador de seguridad no se admite el estado amarillo: un procedimiento crítico sin controles de seguridad validados basta para declarar el proyecto no preparado. Los umbrales del semáforo son una propuesta del autor (origen C).

Tabla 10. Tablero de preparación para el traspaso a mantenimiento

Indicador	Verde	Amarillo	Rojo
Entregables MR aprobados	100%	95% a 99%, con plan de cierre aprobado	Menos de 95%
Activos críticos con análisis completado	100%	95% a 99%, con plan de cierre aprobado	Menos de 95%
Datos maestros con error o incompletos	5% o menos	Más de 5% y hasta 10%, con plan de corrección	Más de 10%
Repuestos críticos catalogados y disponibles	100%	95% a 99%, con fecha de llegada comprometida y mitigación	Menos de 95%
Procedimientos críticos con controles de seguridad validados	100%	No se admite	Menos de 100%
Personal capacitado	100%	90% a 99%, con plan de cierre	Menos de 90%

La Figura 13 resume la regla de decisión del tablero y su relación con el traspaso y el cierre diferido.

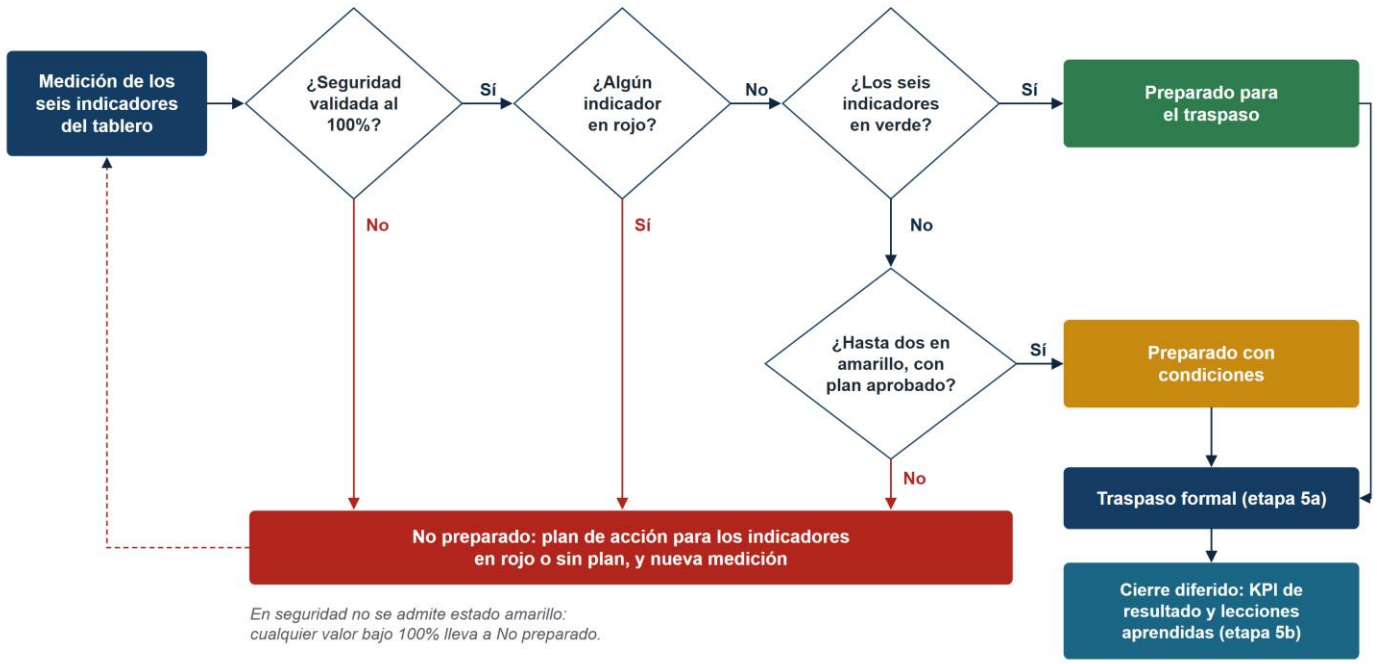

Figura 13. Flujo de decisión del tablero de preparación para el traspaso a mantenimiento

4.6.5 Contribución de la Propuesta a la Gestión de Activos

La edición 2024 de la norma ISO 55000 define la gestión de activos como la actividad coordinada de una organización para realizar valor a partir de sus activos, y precisa que ese valor surge del equilibrio entre costos, riesgos, oportunidades y desempeño (ISO, 2024a). Desde esa

perspectiva, el Maintenance Readiness no es una actividad administrativa de cierre de proyecto, sino el momento en que se fijan las condiciones con las que el activo será gestionado durante toda su vida útil. La Tabla 11 muestra cómo cada etapa de la propuesta contribuye a las decisiones de ciclo de vida, a la realización de valor, a la gestión del riesgo, al desempeño y al alineamiento con los objetivos organizacionales, y qué requisitos de la norma ISO 55001 respalda. Esta relación responde a la brecha B7, presente en tres de los cuatro marcos estudiados.

La Figura 14 representa esa relación como una línea de vista, desde los objetivos de la organización hasta el activo preparado, con los requisitos de ISO 55001:2024 que respaldan cada nivel.

Figura 14. Línea de vista entre los objetivos de la organización y los entregables del Maintenance Readiness

Tabla 11. Contribución de cada etapa de la propuesta a la gestión de activos

Etapa	Contribución a la gestión de activos	Requisitos de ISO 55001:2024 que respalda
1. Planificación y gobernanza	Alinea los objetivos del MR con los objetivos de gestión de activos de la operación receptora y con su plan estratégico (alineamiento); fija el ingreso de mantenimiento en el ciclo de inversión (ciclo de vida); asigna responsabilidades y abre el registro de riesgos de la preparación (riesgo).	4.5 Toma de decisiones de gestión de activos; 5.3 Roles, responsabilidades y autoridades; 6.1 Acciones para abordar riesgos y oportunidades; 6.2.1 Plan estratégico de gestión de activos; 6.2.2 Objetivos de gestión de activos

Etapa	Contribución a la gestión de activos	Requisitos de ISO 55001:2024 que respalda
2. Caracterización técnica	La jerarquía y la criticidad de los activos son la base de todas las decisiones posteriores de mantenimiento, renovación y reemplazo (ciclo de vida); la criticidad es una evaluación de riesgo que concentra el esfuerzo donde hay más valor en juego (riesgo y valor).	6.1 Acciones para abordar riesgos y oportunidades; 7.6 Datos e información
3. Estrategias y tácticas	Define el equilibrio entre costo, riesgo y desempeño de cada activo (valor); fija los puntos de intervención de mantenimiento y las metas de confiabilidad y disponibilidad (desempeño); el stock crítico trata el riesgo de indisponibilidad (riesgo).	8.1 Planificación y control operativo, incluida la gestión del ciclo de vida; 10.3 Acción predictiva
4. Habilitación de sistemas e información	Asegura los datos y la información de activos que respaldarán las decisiones durante toda la operación (ciclo de vida) y las competencias del personal que mantendrá los activos (desempeño).	7.2 Competencia; 7.5 Información documentada; 7.6 Datos e información; 8.2 Control del cambio; 8.3 Procesos, productos, tecnologías y servicios provistos externamente
5. Verificación y cierre	Formaliza el paso de la fase de creación a la de operación y mantenimiento (ciclo de vida); comprueba con indicadores de resultado que el valor esperado sea realizable desde el arranque (desempeño); las lecciones aprendidas alimentan la mejora del sistema de gestión de activos (alineamiento).	4.5 Toma de decisiones de gestión de activos; 9.1 Seguimiento, medición, análisis y evaluación; 9.2 Auditoría interna; 10.1 Mejora continua

Leída de esta forma, la propuesta no se limita a mencionar la norma: cada etapa produce información o decisiones que el sistema de gestión de activos de la operación necesita para cumplir sus requisitos desde el primer día. Esta lectura es coherente con los modelos de gestión del mantenimiento propuestos en la literatura, que tratan la definición de estrategias, la gestión de la información y la mejora continua como pilares de la gestión (Crespo Márquez & Gupta, 2006) e integran el mantenimiento a la estrategia del negocio mediante un ciclo de mejora continua (Barberá et al., 2012), con modelos por etapas que cada organización desarrolla según su situación actual (Viveros et al., 2013); la propuesta traslada esos pilares a la etapa en que el activo todavía no entra en operación.

4.6.6 Trazabilidad Brecha-Mecanismo y Valor Agregado

Con el fin de comprobar que la propuesta responde efectivamente a los vacíos detectados en el análisis comparativo, la Tabla 12 vincula cada una de las diez brechas documentales identificadas en el apartado 4.5.2 con la etapa de la metodología en la que se resuelve y el mecanismo concreto que la aborda. Esta trazabilidad permite verificar que ninguna brecha queda sin un mecanismo

asociado, y constituye uno de los criterios de validación de la propuesta que se detallan en el apartado siguiente.

Tabla 12. Trazabilidad entre las brechas documentales y el mecanismo metodológico que las resuelve

Código	Etapa	Mecanismo
B1	Etapa 5	Auditoría de cierre con lista de verificación y tablero de preparación
B2	Etapa 3	Catalogación obligatoria y plan de stock crítico
B3	Etapa 1 (transversal)	Modelo de gobernanza y RACI desde el gate de apertura, con aceptación del traspaso por la operación
B4	Etapa 2	Variables HSE incorporadas a la caracterización técnica e indicador de procedimientos con controles de seguridad
B5	Transversal	Sistema de 13 indicadores y tablero de preparación
B6	Etapas 2 a 4	Métodos y exigencias mínimas definidos por etapa y nivel de complejidad
B7	Etapa 1	Alineación de los objetivos del MR con el plan estratégico de gestión de activos (apartado 4.6.5)
B8	Etapa 1	Matriz de escalamiento según complejidad (apartado 4.6.2), que generaliza la práctica de Codelco
B9	Etapa 1	Gate de apertura que fija el ingreso de mantenimiento según el avance de la ingeniería, práctica observada en AMSA
B10	Etapa 5	Cierre diferido (a 30 o 90 días según el nivel) con indicadores de resultado y lecciones aprendidas

La Figura 15 prolonga esa trazabilidad hasta el sistema de indicadores. A cada mecanismo se le asocia el indicador de la Tabla 9 que permite comprobar, durante el proyecto o en el cierre diferido, si la brecha efectivamente se cerró. Así, la cadena que parte en una brecha documental termina en una medición concreta, y un indicador que no alcanza su meta señala que el mecanismo no se aplicó o no fue suficiente, lo que orienta el ajuste de la propuesta cuando se aplique en un proyecto real.

Figura 15. Cadena de trazabilidad entre brecha documental, mecanismo, etapa e indicador de verificación

La trazabilidad anterior permite responder una pregunta adicional: qué incorpora la propuesta que hoy no está resuelto de forma integral por los marcos estudiados. La Tabla 13 contrasta los diez mecanismos de la propuesta con el nivel de desarrollo que cada uno alcanza en la documentación de las cuatro compañías, según la escala del apartado 3.6 (Sí: nivel 4 o 5; Parcial: nivel 3; No: nivel 1 o 2).

Tabla 13. Valor agregado de la propuesta respecto de los cuatro marcos estudiados

Mecanismo	Anglo American	BHP	Codelco	AMSA	Propuesta
Ingreso de mantenimiento fijado por un gate (B9)	No	No	Sí	Sí	Etapa 1
Escalamiento según la complejidad (B8)	No	No	Sí	No	Etapa 1 (4.6.2)
Roles y responsabilidades en todas las etapas (B3)	Parcial	No	Sí	Sí	Etapas 1 a 5 (4.6.3)
Guía metodológica por etapa (B6)	Sí	No	Parcial	Parcial	Etapas 2 a 4
Gestión de repuestos críticos (B2)	Sí	Parcial	No	Parcial	Etapa 3
Riesgos HSE en la caracterización (B4)	Sí	Parcial	No	No	Etapa 2
Indicadores y tablero de preparación (B5)	No	No	No	No	Transversal (4.6.4)
Verificación de efectividad antes del cierre (B1)	No	No	No	No	Etapa 5

Mecanismo	Anglo American	BHP	Codelco	AMSA	Propuesta
Vínculo explícito con la gestión de activos (B7)	No	Parcial	No	No	Etapa 1 (4.6.5)
Retroalimentación posterior al arranque (B10)	No	No	No	No	Etapa 5 (cierre diferido)

Ninguno de los marcos desarrolla más de tres de los diez mecanismos, y cuatro de ellos (indicadores, verificación de efectividad, vínculo con la gestión de activos y retroalimentación posterior al arranque) no alcanzan un desarrollo completo en ninguno. El aporte de la propuesta no consiste en inventar estos mecanismos, varios de los cuales existen de forma aislada en algún marco, sino en integrarlos en un solo proceso, con roles, controles e indicadores que los conectan entre sí.

Medida con la misma escala, la propuesta también tiene límites. Para la brecha B6 define qué método aplicar en cada etapa y con qué exigencia mínima según el nivel del proyecto, pero no desarrolla guías de aplicación de cada método, que corresponden a los procedimientos de cada compañía o a la literatura especializada; en esa dimensión alcanzaría un nivel 3. Su aporte se concentra en la gobernanza, la verificación, la medición y la retroalimentación, donde los marcos estudiados muestran sus mayores vacíos.

4.6.7 Criterios de Validación de la Propuesta

Atendiendo a la observación del profesor guía de profundizar la validación, la propuesta se somete a cuatro criterios complementarios. Ninguno de ellos, por separado, demuestra la efectividad de la metodología en operación, que solo podrá medirse aplicándola en proyectos reales; en conjunto, permiten verificar su coherencia interna, su respaldo externo y su aplicabilidad práctica, y reducen la dependencia del juicio del autor señalada en el apartado 3.4.

El primero es la cobertura, verificable en la Tabla 12: cada una de las diez brechas documentales, identificadas con la regla del apartado 3.6, cuenta con al menos un mecanismo asociado. Este criterio es necesario pero no suficiente, porque brechas y mecanismos provienen del mismo análisis; por eso se complementa con los tres siguientes.

El segundo es el contraste de consistencia con referentes externos. Cada etapa se compara con tres fuentes ajenas a las compañías estudiadas: la norma ISO 55001:2024, la presentación de LeBlanc (2014) sobre la preparación del mantenimiento en proyectos de capital y la descripción del servicio de preparación de activos para el mantenimiento de Metso Outotec (2022). Las dos últimas son literatura técnica no arbitrada, elaborada por una empresa de ingeniería y por un proveedor de equipos y servicios. Por eso el contraste muestra que las etapas son consistentes con la práctica que

describe la industria, pero no equivale a una validación independiente. La Tabla 14 muestra que las cinco etapas encuentran respaldo en al menos dos de las tres fuentes.

Tabla 14. Contraste de las etapas de la propuesta con referentes externos

Etapa	ISO 55001:2024	LeBlanc (2014)	Metso Outotec (2022)
1. Planificación y gobernanza	Roles y responsabilidades (5.3); objetivos alineados con la organización (6.2.2)	El MR debe iniciarse a más tardar en la ingeniería de detalle, y el dueño debe diseñarlo, presupuestarlo y exigirlo	No lo aborda de forma explícita
2. Caracterización técnica	Riesgos y oportunidades (6.1); datos e información (7.6)	La estructura de activos y los requisitos de datos se comprometen durante el diseño	Análisis basado en riesgo antes del arranque
3. Estrategias y tácticas	Gestión del ciclo de vida (8.1); acción predictiva (10.3)	Planes de trabajo de mantenimiento y repuestos disponibles antes del arranque	Estrategias con RCM y FMEA en el contexto operacional del sitio, con prácticas de seguridad integradas
4. Habilitación de sistemas e información	Competencia (7.2); datos e información (7.6)	CMMS poblado, datos de proveedores exigidos en los contratos y personal entrenado antes del arranque	Plan preventivo alineado con el CMMS y capacitación completa del personal de mantenimiento
5. Verificación y cierre	Seguimiento y medición (9.1); auditoría interna (9.2); mejora continua (10.1)	Revisiones de preparación del dueño antes del arranque y participación de operación y mantenimiento en el comisionamiento	Mitigación de riesgos operacionales y de mantenimiento antes del arranque

El tercero es la aplicabilidad, que se verifica mediante la aplicación retrospectiva de la metodología a un proyecto real, desarrollada en el apartado 4.7. Esa aplicación permite comprobar si las etapas, la matriz de escalamiento y el tablero de preparación pueden usarse con la información que habitualmente está disponible en un proyecto, y qué habrían cambiado respecto de lo que efectivamente ocurrió.

El cuarto es la evaluación por profesionales con experiencia en Maintenance Readiness, que no pudo ejecutarse dentro del plazo de este trabajo. Para que pueda realizarse en una etapa posterior, el Anexo B deja definido el protocolo: perfil de los evaluadores, instrumento con los criterios de aplicabilidad, claridad, completitud y factibilidad, escala de valoración y criterio de aceptación. Su ejecución queda registrada como un aspecto pendiente de validación en el capítulo de conclusiones.

4.7 Aplicación de la Metodología a un Caso

Para evaluar la aplicabilidad de la propuesta, esta se aplicó de forma retrospectiva a un proyecto real en el que el autor participó como especialista de mantenimiento. Se trata de un servicio de Operational Readiness, del cual se analiza solo su componente de mantenimiento, en coherencia con la definición del Maintenance Readiness como parte del OR adoptada en el apartado 4.1.2. La aplicación es retrospectiva porque contrasta lo efectivamente ejecutado con lo que la metodología habría exigido, y tiene un componente conceptual en los aspectos que el proyecto no contempló, como el tablero de preparación, que se reconstruyen con la información disponible. Conforme al apartado 3.5, el caso se presenta sin identificar la compañía, la faena ni las empresas participantes. La información del caso proviene de la documentación de inicio y planificación del servicio (la solicitud del cliente, la metodología del servicio, la matriz de responsabilidades de los entregables de OR, la presentación de la reunión de inicio y el acuerdo de nivel de servicio de la ejecución) y de la reconstrucción del autor, ordenada con un cuestionario sobre alcance, entregables, aprobaciones, dificultades y resultados. Como la documentación disponible corresponde al inicio del servicio, la descripción de su ejecución y su cierre se apoya principalmente en el recuerdo del autor, lo que expone esa parte del caso a un sesgo de recuerdo.

4.7.1 Descripción del Caso

El proyecto consistió en un conjunto de mejoras al control de procesos del circuito de flotación de una planta concentradora en operación, perteneciente a una de las compañías estudiadas. Se trató de un proyecto brownfield compuesto por varias iniciativas de alcance acotado: incorporación de instrumentación de flujo y densidad, reemplazo de válvulas y sensores de nivel, automatización de la dosificación de reactivos e integración de estos elementos al sistema de control distribuido. En conjunto, según la estimación del autor, el proyecto incorporó más de cincuenta equipos e instrumentos que debían ingresar al CMMS de la operación.

El servicio de preparación operacional se contrató cuando el proyecto ya se encontraba en ejecución y se desarrolló durante cerca de cuatro meses, con un equipo de cinco a seis especialistas: un líder de OR, un especialista de mantenimiento, un especialista de materiales, un responsable de control documental y gestión del cambio, apoyo en salud y seguridad, y un especialista en terreno. Su alcance se organizó según los elementos de OR definidos por el procedimiento de la faena, que asigna responsables por entregable y distingue los requisitos según el tamaño del proyecto. En el componente de mantenimiento, los entregables comprendieron planes de mantenimiento basados en FMECA, procedimientos y pautas, planillas de carga de datos maestros, la recopilación de antecedentes

técnicos de repuestos para su catalogación, un taller de criticidad de repuestos y la organización de la documentación técnica de los proveedores.

4.7.2 Aplicación Retrospectiva de la Metodología

La primera decisión de la metodología es clasificar el proyecto. Con los criterios de la Tabla 6, el caso obtiene 2 puntos en tamaño (más de cincuenta equipos e instrumentos), 2 en criticidad (equipos relevantes para la recuperación de cobre, pero distribuidos en líneas paralelas) y 2 en complejidad (brownfield con varias iniciativas, contratistas e integración al sistema de control), lo que lo sitúa en el nivel II. La clasificación no depende del número exacto de equipos: con 1 punto en tamaño, el puntaje sería 5 y el proyecto seguiría en el nivel II. Según la Tabla 7, ese nivel exige gate de apertura y matriz RACI, un líder de MR con dedicación parcial, matriz de criticidad completa, RCM o FMECA para los activos críticos, catalogación con plan de stock crítico, datos maestros, plan de capacitación con registro, tablero de preparación con indicadores de avance, auditoría interna de cierre y seguimiento a 90 días. La Tabla 15 contrasta, etapa por etapa, lo ejecutado en el proyecto con lo que la metodología habría exigido.

Tabla 15. Aplicación retrospectiva de las cinco etapas al caso

Etapa	Lo ejecutado en el proyecto	Lo que exige la propuesta (nivel II)	Diferencia observada
1. Planificación y gobernanza	Plan OR, taller OR y reunión de inicio (KOM); responsable único por entregable; aprobación tácita contractual a los siete días; servicio contratado en la fase de ejecución, sin participación de mantenimiento en la ingeniería; los entregables previstos para las fases de estudio, como el análisis RAM, no se ejecutaron	Gate de apertura que fija el ingreso de mantenimiento según el avance de la ingeniería; clasificación de complejidad; RACI con revisión obligatoria del área receptora	Ingreso tardío de mantenimiento (B9 en la práctica); aprobación posible sin revisión del receptor
2. Caracterización técnica	Criticidad con la metodología corporativa y taller de validación; inventario de riesgos HSE que compara los riesgos existentes con los nuevos	Matriz de criticidad completa con variables HSE	Sin diferencia relevante

Etapa	Lo ejecutado en el proyecto	Lo que exige la propuesta (nivel II)	Diferencia observada
3. Estrategias y tácticas	Planes basados en FMECA, procedimientos y pautas; antecedentes de repuestos enviados a la central de catalogación del cliente; taller de criticidad de repuestos	RCM o FMECA para activos críticos; procedimientos con controles de seguridad; catalogación y plan de stock crítico con disponibilidad confirmada antes del arranque	Repuestos sin código o sin stock al arranque, por falta de datos del fabricante y dependencia de la catalogación externa
4. Habilitación de sistemas e información	Planillas de carga de datos maestros del cliente, sin carga directa al ERP; documentación de proveedores organizada en un repositorio; capacitaciones de proveedores no realizadas, que el equipo tuvo que facilitar	Carga revisada por el área receptora; seguimiento de los entregables contractuales de proveedores; plan de capacitación con registro	Capacitaciones incompletas e información de proveedores obtenida con dificultad
5. Verificación y cierre	Cierre mediante talleres, actas, minutas y carga de la documentación a un repositorio formal; aprobación por el área de preparación operacional de la faena; sin criterios de efectividad, sin medición posterior al arranque y sin lecciones aprendidas formales	Auditoría interna con tablero de preparación; aceptación firmada por mantenimiento de la operación; cierre diferido a 90 días con lecciones aprendidas	Cierre documental sin verificación de efectividad (B1) ni retroalimentación (B10)

El componente conceptual de la aplicación consiste en reconstruir el tablero de preparación con la información disponible al momento del traspaso (Tabla 16). El resultado es ilustrativo: muestra qué habría señalado el tablero, no una medición realizada durante el proyecto.

Tabla 16. Tablero de preparación reconstruido para el caso

Indicador	Situación observada al traspaso	Estado estimado
Entregables MR aprobados	Todos aprobados, algunos sin revisión exhaustiva del área usuaria	Verde
Activos críticos con análisis completado	Criticidad y planes basados en FMECA completos	Verde
Datos maestros con error o incompletos	Planillas entregadas; la tasa de error no se midió	Sin medición (rojo)
Repuestos críticos catalogados y disponibles	Repuestos sin código o sin stock al arranque	Rojo
Procedimientos críticos con controles de seguridad validados	Los procedimientos incluían análisis seguro de trabajo, pero su validación no se registró como indicador	Sin medición (rojo)
Personal capacitado	Capacitaciones de proveedores no realizadas, facilitadas parcialmente por el equipo	Amarillo

Con la regla de decisión del apartado 4.6.4, el proyecto habría sido declarado no preparado por la disponibilidad de los repuestos críticos y por la falta de medición de dos indicadores, uno de ellos el de seguridad. En la práctica, el traspaso se dio por cerrado con la aprobación documental de los entregables, lo que ilustra la brecha B1: sin criterios de efectividad, el cierre verifica que los entregables existan, pero no que el mantenimiento esté efectivamente preparado.

4.7.3 Evaluación de la Aplicación

La aplicación permite valorar la propuesta con los cuatro criterios que se plantean para el juicio experto en el Anexo B. La Tabla 17 presenta esa valoración, realizada por el autor con base en la evidencia del caso. Por su origen, no sustituye la evaluación por expertos independientes, pero hace explícito el razonamiento que la respalda.

Tabla 17. Evaluación de la propuesta a partir del caso

Criterio	Valoración del autor	Evidencia del caso
Aplicabilidad	Alta	Las cinco etapas pudieron asociarse a actividades reales del proyecto, y la clasificación de complejidad se realizó con información disponible al inicio.
Claridad	Media-alta	La matriz de escalamiento y el tablero se aplicaron sin ambigüedad, aunque algunos umbrales requieren definiciones operativas, por ejemplo, qué se considera un repuesto disponible.
Completitud	Alta	Todas las dificultades del caso tienen un mecanismo en la propuesta, salvo el control de los cambios de equipos durante el comisionamiento, que no estaba explicitado como actividad y se incorporó a la etapa 4 a partir de este resultado.
Factibilidad	Media	La propuesta exige mediciones y roles que el proyecto no tuvo, como el líder de MR y la revisión obligatoria del receptor, lo que implica un esfuerzo adicional que debe acordarse con el dueño desde el inicio.

4.7.4 Hallazgos sobre la Ejecución del Maintenance Readiness

Más allá de la validación, el caso aporta evidencia sobre la forma en que se ejecuta el Maintenance Readiness en la práctica, objeto del objetivo específico OE3. En cuanto a las actividades, el trabajo se concentró en traducir la información de ingeniería y de los proveedores en planes, procedimientos, pautas, datos maestros y antecedentes de repuestos, en formatos definidos por el cliente y mediante talleres de validación. En cuanto a los perfiles, el equipo combinó especialistas en confiabilidad, materiales, control documental y seguridad, con un líder que articulaba la relación con el área receptora y con un especialista en terreno.

Los factores que favorecieron la eficiencia fueron tres: la experiencia previa del equipo con el mismo cliente, que permitía conocer sus plataformas, herramientas y tiempos; el acceso directo a toda la información de ingeniería, porque la ingeniería del proyecto había sido desarrollada por la misma empresa; y la existencia de interlocutores conocidos en el área receptora. Las dificultades, en cambio, se concentraron en la interfaz entre el proyecto y la operación: el tiempo disponible del cliente para revisar y aprobar los entregables, con revisiones que en ocasiones no fueron exhaustivas; la calidad menor de los entregables cuando el área usuaria no participaba en su revisión; los alcances poco claros de algunas iniciativas; la desconexión entre quienes diseñan y quienes reciben el activo, incluidos cambios de equipos durante el comisionamiento; y la dificultad para obtener datos de los fabricantes y capacitaciones de los proveedores. Estos hallazgos provienen de un solo caso en el que el autor participó, por lo que son ilustrativos y no generalizables; su valor está en que coinciden con las brechas documentales identificadas y con los riesgos descritos por LeBlanc (2014).

4.8 Discusión de los Resultados

Los resultados anteriores admiten una lectura que va más allá de la comparación entre los cuatro marcos. Este apartado los contrasta con la literatura sobre la puesta en marcha de proyectos y la gestión de activos, plantea una explicación alternativa para parte de las brechas y precisa hasta dónde pueden generalizarse.

El primer contraste se refiere a los factores críticos del apartado 4.5.1. El Construction Industry Institute identificó dieciséis factores críticos de éxito para el comisionamiento y la puesta en marcha, entre ellos el liderazgo, el alineamiento del equipo, la gestión de interfaces, los criterios de éxito, la planificación, el financiamiento de la planificación, las herramientas de apoyo y la información (CII, 2015). Los cinco factores observados en los marcos tienen un equivalente en esa lista: la formalización temprana de entregables, en la planificación; la gobernanza explícita, en el liderazgo, el alineamiento y la gestión de interfaces; la profundidad técnica, en la capacidad y las herramientas de apoyo; la orientación a sistemas, en la información; y la precisión del alcance, en los criterios de éxito. El estudio del CII incluye además dos factores que ninguno de los marcos trata como requisito: el financiamiento de la planificación y el reconocimiento de los impulsores de valor. El primero coincide con la condición de contar con un presupuesto específico para el MR (apartado 5.1), y el segundo con la brecha B7, la débil articulación del MR con los objetivos de gestión de activos. La coincidencia da respaldo externo a los factores identificados, aunque no reemplaza una medición de su efecto en proyectos.

El segundo contraste se refiere a la brecha más clara del estudio: ninguno de los marcos verifica la efectividad del MR, lo mide con indicadores ni lo retroalimenta después del arranque. Una explicación posible es que los cuatro documentos se conciben como requisitos del proyecto, cuyo horizonte termina con el traspaso. El modelo de planificación de la puesta en marcha del CII organiza sus actividades en ocho fases que concluyen con el traspaso y el cierre del proyecto (CII, 1998), y el Institute of Asset Management sitúa el traspaso a operaciones dentro del tema de creación y adquisición de activos (IAM, 2024). Lo que ocurre después pertenece a la operación, y la comprobación de que el mantenimiento quedó efectivamente preparado queda entre ambas responsabilidades. La propuesta aborda ese vacío con el cierre diferido de la etapa 5, que obliga a medir el resultado cuando el activo ya opera. La importancia de hacerlo la ilustra LeBlanc (2014): cuando el mantenimiento no está preparado, con documentación de proveedores tardía, personal sin capacitar, repuestos ausentes o un CMMS incompleto, el arranque se retrasa, la disponibilidad disminuye y se posterga la producción de régimen, con un menor retorno del capital invertido.

Un antecedente posterior refuerza esta lectura. La documentación de trabajo de Codelco sobre la actualización de su sistema operativo de mantenimiento, elaborada en 2026 con posterioridad a la versión de la norma analizada en este estudio, reconoce en la aplicación de su marco de mantenibilidad y confiabilidad en proyectos una gobernanza difusa, un seguimiento no estandarizado, la falta de cierre formal de brechas y la ausencia de indicadores de efectividad, y plantea exigir condiciones mínimas antes de avanzar de etapa y conectar el proceso con el riesgo, el ciclo de vida, el CMMS y la transferencia a operaciones (Codelco, 2026). Esos diagnósticos coinciden con las brechas B1, B5 y B7 que este trabajo asignó a ese marco. Parte de las mejoras que plantea tiene equivalentes en la propuesta de este trabajo, que se formuló sin conocer esa documentación: un índice de calidad de los entregables con la misma fórmula del indicador de entregables aprobados sin observaciones, indicadores de cumplimiento de entregables y de cierre oportuno de acciones, un indicador de preparación de los datos en el CMMS y la participación del área de mantenimiento en las instancias clave, que la propuesta exige mediante la revisión obligatoria del área receptora. Otras, como el seguimiento de la cartera completa de proyectos, la gobernanza en tres niveles y la revisión de pares al cierre de cada etapa, van más allá del proyecto individual en que se sitúa la propuesta y podrían complementarla. En la documentación revisada no aparece, en cambio, una verificación posterior al arranque (B10), que sigue siendo el aporte más diferenciador de la propuesta. La coincidencia, alcanzada de forma independiente, no reemplaza la validación por expertos, pero indica que las brechas identificadas con la regla del apartado 3.6 son reconocidas también por quienes administran uno de los marcos.

Existe también una explicación alternativa para parte de las brechas. En el caso del apartado 4.7, el procedimiento de preparación operacional de la faena distinguía los requisitos según el tamaño del proyecto, un elemento que el estándar corporativo de la misma compañía no desarrolla. Las brechas documentales, por lo tanto, pueden sobrestimar los vacíos reales cuando las faenas complementan el estándar corporativo con procedimientos propios. Esta posibilidad no invalida el diagnóstico, porque lo que el estándar corporativo no establece queda a criterio de cada faena o de cada equipo, que es precisamente la variabilidad que la propuesta busca reducir. Indica, además, que la estandarización podría apoyarse en prácticas que ya existen en terreno.

Por último, los resultados se pueden generalizar con distinto alcance. La caracterización y la comparación describen documentos específicos, en versiones determinadas, y solo valen para ellos. Las brechas transversales, en cambio, coinciden con los problemas que describe la literatura sobre la puesta en marcha, lo que sugiere que no son propias de las cuatro compañías estudiadas. La

propuesta es aplicable en principio a otros proyectos intensivos en activos, pero su efectividad solo podrá establecerse con su aplicación prospectiva y con el juicio experto previsto en el Anexo B.

5 Planes de Acción y Mejora

La pauta del trabajo final pide que el análisis se traduzca en un aporte concreto. Este capítulo lo hace en dos niveles. El primero es una hoja de ruta para que una organización minera adopte la propuesta metodológica, con acciones de corto, mediano y largo plazo. El segundo son oportunidades de mejora específicas para cada uno de los cuatro marcos estudiados, derivadas de las brechas documentales del apartado 4.5.2, que pueden incorporarse, aunque la organización no adopte la metodología completa. Ambos responden al objetivo específico OE6.

5.1 Hoja de Ruta para la Adopción de la Propuesta

La adopción se plantea de forma gradual, partiendo por un proyecto piloto que permita calibrar las metas y los umbrales que hoy son propuesta del autor, antes de incorporar la metodología a los estándares corporativos. La Tabla 18 resume las acciones, sus responsables y el resultado esperado de cada una, y la Figura 16 las ordena en el tiempo junto con el hito que cierra cada horizonte.

Tabla 18. Hoja de ruta para la adopción de la propuesta metodológica

Horizonte	Acción	Responsable	Resultado esperado
Corto plazo (0 a 6 meses)	Aplicar la metodología como piloto en un proyecto de nivel II, con el tablero de preparación y la RACI	Mantenimiento de la operación receptora y gerencia del proyecto	Primera medición real de los indicadores y calibración de las metas de origen C
Corto plazo	Designar un líder de MR y formalizar la revisión obligatoria del área receptora	Patrocinador del proyecto	Responsable identificable y aprobación con participación del receptor
Corto plazo	Incorporar en las órdenes de compra los entregables de información y de capacitación de los proveedores	Abastecimiento del proyecto	Datos de fabricantes y capacitaciones disponibles antes del traspaso
Mediano plazo (6 a 18 meses)	Integrar las cinco etapas y sus gates al estándar corporativo de entrega de proyectos	Área corporativa responsable del estándar de MR	Requisitos de MR exigibles en todos los proyectos
Mediano plazo	Ejecutar el protocolo de juicio experto del Anexo B y ajustar la propuesta con sus resultados	Autor y área corporativa de mantenimiento	Validación externa de la propuesta
Mediano plazo	Definir con ingeniería el procedimiento de control de cambios de equipos de la etapa 4	Líder de MR	Datos maestros que reflejen la configuración final instalada
Mediano plazo	Crear un repositorio de lecciones aprendidas de MR alimentado por los cierres diferidos	Gerencia de mantenimiento	Retroalimentación entre proyectos

Horizonte	Acción	Responsable	Resultado esperado
Largo plazo (más de 18 meses)	Comparar indicadores entre proyectos y revisar los umbrales de la matriz de escalamiento y del tablero	Área corporativa de gestión de activos	Metas basadas en datos propios de la organización
Largo plazo	Vincular el MR al plan estratégico de gestión de activos y a las auditorías del sistema de gestión	Área corporativa de gestión de activos	MR integrado al ciclo de mejora continua de ISO 55001

Figura 16. Hoja de ruta para la adopción de la propuesta: acciones por horizonte e hitos esperados

La hoja de ruta descansa en cuatro condiciones habilitantes: el patrocinio del dueño del proyecto, sin el cual la preparación del mantenimiento tiende a quedar sin responsable (LeBlanc, 2014); un presupuesto específico para el MR; la disponibilidad del área receptora para participar en las revisiones; y la incorporación de exigencias de información y capacitación en los contratos con proveedores. Sus principales riesgos son la percepción de carga administrativa en proyectos menores, que la matriz de escalamiento busca acotar, y el uso prolongado de metas que no han sido calibradas con datos propios.

5.2 Oportunidades de Mejora para los Marcos Estudiados

Las brechas documentales del apartado 4.5.2 permiten formular, para cada marco, mejoras que pueden incorporarse de forma independiente de la propuesta completa. La Tabla 19 las resume, en un tono constructivo: cada marco ya resuelve bien algunos aspectos, y las mejoras apuntan a completar los que no desarrolla.

Tabla 19. Oportunidades de mejora para los marcos de Maintenance Readiness estudiados

Marco	Brechas documentales	Mejora sugerida
Anglo American	B1, B5, B7, B8, B9, B10	Fijar el hito de ingreso de mantenimiento y un mecanismo de escalamiento por complejidad, y agregar indicadores y un cierre posterior al arranque a su amplio desarrollo metodológico.
BHP	B1, B3, B5, B6, B8, B9, B10	Complementar el estándar de requisitos mínimos con roles por entregable, una guía breve de aplicación de cada método, criterios de verificación e indicadores.
Codelco	B1, B2, B4, B5, B7, B10	Desarrollar la gestión de repuestos críticos y la evaluación HSE dentro de la norma, y agregar indicadores y retroalimentación posterior al arranque a su esquema formal de entregables.
AMSA	B1, B4, B5, B7, B8, B10	Incorporar a sus requisitos de entrega a mantenimiento variables HSE, escalamiento por complejidad, indicadores y un cierre posterior al arranque.

Las brechas presentes en los cuatro marcos (B1, B5 y B10) apuntan a tres prácticas que la industria podría adoptar en conjunto, con independencia del marco de cada compañía: verificar la efectividad del MR antes del cierre, medirlo con indicadores y retroalimentarlo después del arranque.

6 Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo responde uno a uno los objetivos del trabajo, distinguiendo en cada caso lo que el análisis demuestra, lo que la propuesta aporta, sus limitaciones y lo que queda pendiente de validar. Luego presenta una tabla que traza cada objetivo hasta su evidencia, consolida las limitaciones y los aspectos pendientes, y cierra con las recomendaciones que se desprenden del estudio para quienes ejecutan o exigen procesos de Maintenance Readiness.

6.1 Cumplimiento de los Objetivos

En relación con el OE1, el trabajo caracterizó los marcos de Maintenance Readiness de Anglo American, BHP, Codelco y AMSA a partir de su documentación normativa interna (apartado 4.3). El hallazgo demostrado es que los cuatro comparten un núcleo común de requisitos (criticidad, estrategias de mantenimiento, datos maestros, catalogación y traspaso formal), pero difieren en la naturaleza del documento que los contiene: una guía metodológica extensa, un estándar de requisitos mínimos, una norma organizada por etapas del ciclo de inversión y los requisitos asociados a un sistema corporativo de entrega de activos.

En relación con el OE2, la comparación con una escala única de valoración (apartados 3.6 y 4.4) muestra que ningún marco alcanza los niveles más altos en todas las dimensiones: Anglo American destaca en profundidad metodológica y amplitud temática, Codelco en formalización y trazabilidad, AMSA en gobernanza, y BHP comparte con Anglo American y AMSA el nivel más alto en orientación a los sistemas de información, con un alcance acotado y preciso. Este resultado describe el desarrollo documental de cada marco en las seis dimensiones analizadas. Las valoraciones dependen del juicio del autor, acotado por la rúbrica y el registro de trazabilidad, y no han sido contrastadas con las propias compañías.

En relación con el OE3, el caso del apartado 4.7 muestra cómo se ejecuta en la práctica el Maintenance Readiness dentro de un servicio de Operational Readiness: un equipo pequeño y multidisciplinario, contratado ya en la fase de ejecución, que desarrolla planes, procedimientos, datos maestros y antecedentes de repuestos, y que depende de la disponibilidad del área receptora para revisar y aprobar. Los factores de eficiencia observados fueron la experiencia previa con el cliente, el acceso directo a la ingeniería y la existencia de interlocutores conocidos; las dificultades, el ingreso tardío de mantenimiento, la información incompleta de los fabricantes, las capacitaciones no realizadas y la aprobación sin revisión exhaustiva. Al provenir de un solo caso en el que el autor participó, estos hallazgos son ilustrativos y no generalizables. Por esa razón, el OE3 se considera cumplido de forma

parcial: el análisis histórico que plantea requiere una muestra de proyectos que excede el alcance de este trabajo y queda como línea futura (apartado 6.4).

En relación con el OE4, el trabajo identificó cinco factores críticos de éxito, diez brechas documentales y cinco buenas prácticas transferibles (apartado 4.5). La regla de decisión del apartado 3.6 permitió que cada brecha quedara justificada por un referente, por el nivel asignado en cada marco y por su consecuencia. Cinco brechas resultaron transversales: la ausencia de criterios para verificar la efectividad del MR antes del cierre, de indicadores y de retroalimentación posterior al arranque, presentes en los cuatro marcos, y la débil articulación con el sistema de gestión de activos y la falta de escalamiento de las exigencias según la complejidad del proyecto, presentes en tres.

En relación con el OE5, se desarrolló una propuesta metodológica de cinco etapas con gates (apartado 4.6), complementada con un mecanismo de escalamiento según la complejidad del proyecto, un modelo de gobernanza con cinco roles y reglas de revisión, un sistema de trece indicadores con un tablero de seis para la decisión de traspaso y la vinculación de cada etapa con los requisitos de ISO 55001:2024. Su aporte está en integrar en un solo proceso diez mecanismos que hoy se encuentran dispersos o ausentes en los marcos estudiados, más que en crear mecanismos nuevos. La propuesta se sometió a tres de los cuatro criterios de validación definidos (cobertura, contraste con referentes externos y aplicación a un caso), que respaldan su coherencia y su aplicabilidad, pero todavía no su efectividad; la validación por juicio experto queda pendiente.

En relación con el OE6, el capítulo 5 propone una hoja de ruta de adopción en tres horizontes y oportunidades de mejora específicas para cada marco. Su efectividad dependerá de condiciones que exceden a la metodología, como el patrocinio del dueño, la disponibilidad del área receptora y la incorporación de exigencias en los contratos con proveedores.

6.2 Trazabilidad de los Objetivos

La Tabla 20 resume, para cada objetivo específico, la fase metodológica aplicada, el resultado obtenido, la evidencia que lo respalda dentro del documento y la conclusión asociada, de modo que el cumplimiento de cada objetivo pueda verificarse desde el planteamiento inicial del trabajo hasta su cierre.

Tabla 20. Trazabilidad de los objetivos específicos

OE	Metodología aplicada	Resultado obtenido	Evidencia	Conclusión asociada	Cumplimiento
OE1	Revisión documental y caracterización estructurada (fases 1 y 2)	Caracterización de los cuatro marcos	Apartado 4.3 y tabla de síntesis	Núcleo común de requisitos, con estructuras y naturaleza documental distintas	Cumplido
OE2	Comparación con escala única y anclajes (fase 3)	Radar de desarrollo documental y mapa de cobertura	Apartados 3.6 y 4.4	Ningún marco domina todas las dimensiones; su desarrollo es complementario	Cumplido
OE3	Aplicación retrospectiva a un proyecto real y experiencia profesional del autor (fase 6)	Actividades, perfiles, factores de eficiencia y dificultades	Apartado 4.7	Ingreso tardío y dependencia del receptor y de los proveedores; eficiencia apoyada en la experiencia previa	Parcial: evidencia de un solo caso
OE4	Regla de decisión de brechas y síntesis (fase 4)	Cinco factores, diez brechas documentales y cinco buenas prácticas	Apartados 4.5 y 4.8	Cinco brechas transversales: verificación, indicadores, retroalimentación, vínculo con la gestión de activos y escalamiento por complejidad	Cumplido, con factores derivados de los documentos
OE5	Diseño de la propuesta y validación (fases 5 y 6)	Metodología de cinco etapas con escalamiento, gobernanza, trece indicadores y vínculo con ISO 55001	Apartados 4.6 y 4.7	Integra diez mecanismos dispersos; evaluada con tres de cuatro criterios de validación	Cumplido; efectividad pendiente de validación
OE6	Síntesis de brechas y de los resultados del caso	Hoja de ruta de adopción y mejoras por marco	Capítulo 5	Adopción gradual, con un piloto en un proyecto de nivel II	Cumplido

6.3 Limitaciones

Los resultados deben leerse a la luz de cinco limitaciones. La primera es su naturaleza documental: las brechas describen lo que los marcos no establecen y no lo que las compañías dejan de hacer. La segunda es que las valoraciones dependen del juicio del autor, acotado, pero no eliminado, por la escala, la regla de decisión y el registro de trazabilidad; además, las valoraciones las

asignó un único evaluador, sin un contraste de concordancia con un segundo evaluador. La tercera es que la validación de la propuesta descansa en un solo caso, retrospectivo y con participación del autor, y en un contraste externo apoyado en una norma de sistema de gestión y en literatura técnica no arbitrada. La cuarta es la asimetría de la documentación disponible entre las compañías y su vigencia: al menos uno de los marcos se encuentra en actualización (Codelco, 2026), por lo que algunas brechas documentales podrían cerrarse en sus próximas versiones. La quinta es que la confidencialidad de las fuentes impide reproducir en el informe el detalle que respalda cada valoración, que se conserva en un registro interno.

6.4 Aspectos Pendientes de Validación y Líneas Futuras

Quedan pendientes la evaluación de la propuesta por expertos, con el protocolo del Anexo B; la calibración de las metas de origen C y de los umbrales de la matriz de escalamiento y del tablero, mediante un piloto prospectivo; y el contraste de las brechas documentales con la práctica efectiva de las compañías, mediante entrevistas o revisión de proyectos, que permitiría distinguir cuáles de ellas son también brechas operacionales. Queda pendiente, además, la revisión de una muestra de proyectos ejecutados, que permitiría completar el análisis histórico planteado en el OE3, y la valoración independiente de una muestra de elementos por un segundo evaluador, para medir la concordancia de la escala. Como líneas futuras se proponen extender el análisis a otras compañías, incorporando a la propuesta las buenas prácticas de sus marcos, y a otras industrias intensivas en activos, e incorporar indicadores que este trabajo consideró, pero no incluyó para no sobrecargar el sistema, como el costo del MR frente a su presupuesto, el OPEX del primer año frente al estimado, la satisfacción del área receptora, el cumplimiento del plan preventivo a 90 días y la participación del área receptora en las instancias clave del proyecto, como la que mide la actualización en curso de uno de los marcos (Codelco, 2026).

6.5 Recomendaciones

Para quienes ejecutan o exigen procesos de Maintenance Readiness, el estudio permite formular cinco recomendaciones. Primero, iniciar la preparación del mantenimiento durante la ingeniería, con un gate que fije el ingreso del área de mantenimiento, y no al acercarse el comisionamiento. Segundo, exigir que el área que recibirá el activo participe en la revisión de cada entregable, sin que la aprobación por plazo sustituya esa revisión. Tercero, incluir en las órdenes de compra los entregables de información y capacitación de los proveedores, y hacerles seguimiento desde el inicio. Cuarto, decidir el traspaso con un tablero de preparación en el que la seguridad no

admita excepciones. Quinto, cerrar el MR después del arranque, a los 90 días en los proyectos de mayor complejidad, con indicadores de resultado y lecciones aprendidas que retroalimenten los proyectos siguientes.

7 Bibliografía

Las cinco primeras referencias corresponden a documentación interna de las compañías estudiadas. Conforme al criterio expuesto en el apartado 3.5, se omiten sus códigos de documento, títulos exactos, números de revisión y áreas emisoras. El detalle completo de cada fuente se conserva en el registro de trabajo interno del autor y está disponible para el profesor guía.

Anglo American. (2019). Guía corporativa de Maintenance Readiness. Documento normativo interno, no publicado.

Antofagasta Minerals S.A. (2026). Documentación interna sobre la entrega de proyectos al área de mantenimiento. Documento interno, no publicado.

BHP. (2022). Estándar corporativo de requerimientos de alistamiento de mantenimiento. Documento normativo interno, no publicado.

Codelco. (2021). Norma corporativa de mantenibilidad y confiabilidad en proyectos de inversión. Documento normativo interno, no publicado.

Codelco. (2026). Documentación de trabajo sobre la actualización del sistema operativo de mantenimiento. Documento interno, no publicado.

Barberá, L., Crespo, A., Viveros, P., & Stegmaier, R. (2012). Advanced model for maintenance management in a continuous improvement cycle: integration into the business strategy. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 3(1), 47-63. https://doi.org/10.1007/s13198-012-0092-y

CII. (1998). Planning for Startup: Overview of Research (Research Summary 121-1). Construction Industry Institute, The University of Texas at Austin.

CII. (2015). Critical Success Factors for Project Commissioning and Startup (Research Summary 312-1). Construction Industry Institute, The University of Texas at Austin.

Cochilco. (2026). Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2025. Comisión Chilena del Cobre. Santiago. Disponible en: https://www.cochilco.cl/web/download/1036/2026/16853/anuario-de-estadisticas-del-cobre-y-otros-minerales-2025.pdf (Consultado: 14 de octubre de 2026).

Consejo Minero. (2026). Reporte Anual 2025. Consejo Minero. Santiago. Disponible en: https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2026/05/CONSEJO-MINERO-REPORTE-ANUAL-2025.pdf (Consultado: 14 de octubre de 2026).

Crespo Márquez, A., & Gupta, J. (2006). Contemporary maintenance management: process, framework and supporting pillars. Omega, 34(3), 325-338. https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.11.003

IAM. (2024). Asset Management: an Anatomy (Version 4). The Institute of Asset Management.

ISO. (2024a). ISO 55000:2024 Asset management: Vocabulary, overview and principles. International Organization for Standardization. Geneva.

ISO. (2024b). ISO 55001:2024 Asset management: Asset management system, Requirements. International Organization for Standardization. Geneva.

LeBlanc, R. (2014). Maintenance Readiness: Critical Needs for Early and Long Lasting Returns [Presentación, 4 de abril de 2014]. Fluor Corporation.

Metso Outotec. (2022). Asset Maintenance Readiness (AMR) [Folleto técnico]. Metso Outotec.

Mitchell, J. S. (2007). Physical Asset Management Handbook (4th ed.). Clarion Technical Publishers.

Moubray, J. (1997). Reliability-Centered Maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. Oxford.

SAE International. (1999). SAE JA1011: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes. SAE International.

Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 21(1), 125-138.

8 Anexos

8.1 Anexo A: Glosario de Términos

ADS (Asset Delivery System): Sistema de gestión de entrega de activos de Antofagasta Minerals, que establece los estándares y procedimientos para la incorporación de activos a operación.

AS&R (Asset Strategy & Reliability): Función corporativa de Anglo American responsable de los estándares de estrategia y confiabilidad de activos.

As-built: documentación técnica que refleja la configuración final realmente construida e instalada de un activo, por oposición a la configuración prevista en el diseño original.

BOM (Bill of Materials): Lista de materiales que detalla los componentes y repuestos asociados a un equipo, utilizada como base para la gestión de inventario de mantenimiento.

Brecha documental: elemento del Maintenance Readiness que no está desarrollado en el documento normativo revisado de una compañía, lo que no implica necesariamente que la compañía no lo ejecute en la práctica.

CMMS (Computerized Maintenance Management System): Sistema informático de gestión del mantenimiento. En las compañías analizadas, SAP PM es el CMMS usado.

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis): Análisis de modos de falla y sus efectos, metodología de ingeniería de confiabilidad utilizada para identificar las formas en que un equipo puede fallar y las consecuencias de cada falla.

FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis): Extensión del FMEA que incorpora el análisis de criticidad de cada modo de falla, para priorizar las acciones de mantenimiento.

Gate: punto de control formal que cierra una etapa del proceso y condiciona el inicio de la siguiente, verificando que los entregables comprometidos se encuentren completos y aprobados.

Greenfield: proyecto desarrollado en un emplazamiento nuevo, sin instalaciones previas, por oposición a los proyectos de expansión o modificación de operaciones existentes.

Handover: Proceso formal de transferencia de responsabilidad sobre activos desde el equipo de proyecto hacia el equipo de operaciones y mantenimiento.

HSE (Health, Safety and Environment): ámbito de gestión que agrupa los aspectos de salud ocupacional, seguridad y medio ambiente asociados a la operación y el mantenimiento de los activos.

KOM (Kick Off Meeting): Reunión de inicio de un proyecto o proceso, en la que se validan alcances, roles, responsabilidades y compromisos entre las partes involucradas.

LOTO (Lockout-Tagout): Sistema de aislación y bloqueo de energías peligrosas para el mantenimiento seguro de equipos.

Maintenance Readiness (MR): Proceso que asegura que los sistemas, procesos y capacidades de mantenimiento estén disponibles y operativos antes del traspaso a operaciones de un nuevo activo o proyecto, y que verifica su efectividad durante la operación inicial.

MECoE (Maintenance and Engineering Centre of Excellence): Centro de Excelencia de Mantenimiento e Ingeniería de BHP, responsable de los estándares corporativos de mantenimiento.

NCC-30: denominación interna con que se identifica la norma corporativa de Codelco que establece los lineamientos para el análisis de mantenibilidad y confiabilidad en proyectos de inversión.

Operational Readiness (OR): Proceso integral de preparación de una organización para recibir y operar un nuevo activo o proyecto, que abarca múltiples dimensiones: producción, mantenimiento, cadena de suministro, tecnología, personas y seguridad.

RACI (Responsible, Accountable, Consulted, Informed): matriz que asigna, para cada actividad, quién la ejecuta, quién responde por ella, a quién se consulta y a quién se informa.

RAM (Reliability, Availability and Maintainability): Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de sistemas, usado para evaluar el desempeño esperado y optimizar el diseño y las estrategias de mantenimiento.

RCM (Reliability Centered Maintenance): Proceso estructurado para determinar qué debe hacerse para asegurar que un activo físico continúe cumpliendo su función en su contexto operacional presente, basado en el análisis sistemático de sus modos de falla y sus consecuencias.

SAG (Semi-Autogenous Grinding): molino de molienda semiautógena, equipo de gran tamaño y alta criticidad en el circuito de procesamiento de mineral de las plantas concentradoras.

SAP PM (SAP Plant Maintenance): Módulo del sistema ERP SAP dedicado a la gestión del mantenimiento, usado por las cuatro compañías estudiadas como CMMS corporativo.

SOMA (Sistema Operativo de Mantenimiento): Marco de gestión del mantenimiento de Codelco, que define el modelo operacional, estándares y procesos de mantenimiento aplicables a todas las divisiones.

Tablero de preparación: conjunto de seis indicadores de estado, con semáforo y regla de decisión, que permite declarar si un proyecto está preparado para el traspaso a mantenimiento.

UT (Ubicación Técnica / Ubicación Funcional): Unidad estructural en SAP PM que representa la estructura funcional de una instalación o equipo, utilizada como base para la jerarquía de activos en el sistema de mantenimiento.

8.2 Anexo B: Protocolo de Validación por Juicio Experto

Este protocolo define cómo evaluar la propuesta metodológica con profesionales externos al autor, como cuarto criterio de validación del apartado 4.6.7. Se recomienda convocar entre tres y cinco evaluadores con al menos cinco años de experiencia en Maintenance Readiness u Operational Readiness en proyectos mineros, procurando que estén representadas tres perspectivas: la del dueño

del proyecto, la de la operación que recibe los activos y la de las empresas de ingeniería o consultoría que ejecutan el proceso. Cada evaluador recibe la descripción de la propuesta y responde de forma individual, sin conocer las respuestas de los demás.

El instrumento de la Tabla 21 pide valorar siete elementos de la propuesta según cuatro criterios: aplicabilidad (puede usarse en proyectos reales de la gran minería), claridad (se entiende sin ambigüedad), completitud (no omite elementos esenciales) y factibilidad (puede ejecutarse con los recursos y plazos habituales). Cada criterio se valora de 1 a 4, donde 1 es inadecuado, 2 es poco adecuado, 3 es adecuado y 4 es plenamente adecuado, y el evaluador puede agregar comentarios. Un elemento se considera validado cuando todos los evaluadores le asignan 3 o 4 en los cuatro criterios. Se exige acuerdo total porque, con un panel de tres a cinco personas, un solo desacuerdo representa entre un 20% y un 33% de las opiniones; en paneles de seis o más evaluadores puede aplicarse un umbral de acuerdo del 80%. Los elementos que no alcancen ese umbral se ajustan según los comentarios y se someten a una segunda ronda de evaluación.

Tabla 21. Instrumento de evaluación de la propuesta por juicio experto

Elemento evaluado	Aplicabilidad (1-4)	Claridad (1-4)	Completitud (1-4)	Factibilidad (1-4)	Comentarios
Etapa 1. Planificación y gobernanza					
Etapa 2. Caracterización técnica de activos					
Etapa 3. Estrategias y tácticas de mantenimiento					
Etapa 4. Habilitación de sistemas e información					
Etapa 5. Verificación y cierre del MR					
Matriz de escalamiento según complejidad					
Tablero de preparación para el traspaso					