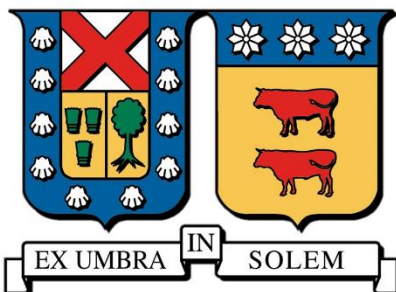


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA COMERCIAL
VALPARAÍSO - CHILE



POTENCIAL IMPACTO DE LA METODOLOGÍA PHM EN LAS ESTRATEGIAS DE
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL EN EL MERCADO MINERO NACIONAL

GERMÁN GABRIEL GANDULFO MANRÍQUEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO COMERCIAL

PROFESORA GUÍA: DRA. TERESITA ARENAS YÁÑEZ
PROFESOR CORREFERENTE: DR. PATRICIO RUBIO ROMERO

OCTUBRE 2022

Índice

Agradecimientos	4
Resumen ejecutivo	5
Introducción	7
1. Antecedentes generales	9
1.1. Planteamiento del problema	9
1.2. Objetivos	12
1.2.1. Objetivo general	12
1.2.2. Objetivos específicos.....	12
1.3. Justificación	13
1.4. Alcances	14
2. Marco teórico	15
2.1. Aspectos generales	15
2.2. Industria 4.0	16
2.2.1. Qué es la Industria 4.0.....	16
2.2.2. Conceptos asociados a la Industria 4.0	17
2.2.3. Perspectivas de inversión relacionada a la Industria 4.0	23
2.3. Gestión de activos	25
2.3.1. Qué es la gestión de activos	25
2.3.2. Gestión del mantenimiento	25
2.3.3. Diferencia entre gestión de activos y gestión del mantenimiento	26
2.4. Mantenimiento industrial	26
2.4.1. Qué es el mantenimiento industrial.....	26
2.4.2. Políticas de mantenimiento	27
2.4.3. Mantenimiento industrial 4.0	28
2.5. Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM)	30
2.5.1. Conceptos generales	30
2.5.2. Caracterización de la metodología PHM	32
2.5.3. Casos de estudio.....	34
3. Planteamiento metodológico de investigación	40
3.1. Consideraciones generales	40
3.2. Tipo de investigación	40
3.3. Propuesta metodológica	40

4. Desarrollo de la investigación	43
4.1. Ideas generales	43
4.2. Análisis del mercado de mantenimiento industrial	44
4.2.1. Caracterización de la oferta dentro del mercado nacional.....	44
4.2.2. Descripción de la demanda relacionada a la industria minera	61
4.3. Aspectos fundamentales de la metodología PHM	73
4.3.1. Análisis de las principales características.....	73
4.3.2. Modelos de propuestas de valor de la metodología PHM.....	78
4.4. Análisis comparativo	88
4.4.1. Desarrollo del análisis	88
4.4.2. Tablas comparativas.....	94
4.5. Entrevistas a partes interesadas de la industria minera nacional	96
4.5.1. Elaboración de las entrevistas.....	96
4.5.2. Realización de las entrevistas.....	104
Conclusiones	113
Recomendaciones.....	116
Referencias bibliográficas	117
Anexos.....	123

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de la propuesta metodológica de investigación. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 2: Esquema funcionamiento sistema MODMA. Fuente: shenre.cl.	53
Figura 3: Esquema servicio monitoreo de condición IIoT para maquinarias. Fuente: evtech.cl.	57
Figura 4: Esquema tipos de rodamientos. Fuente: nskamericas.com.	83
Figura 5: Esquema de la propuesta de estructuración de las entrevistas. Fuente: Elaboración propia.	99

Índice de gráficos

Gráfico 1: Estimación de la vida útil remanente (RUL) de una turbina de vapor. Fuente: link.springer.com. ...	39
Gráfico 2: Modelo de degradación de un motor eléctrico. Fuente: predictto.com.	47
Gráfico 3: Confiabilidad de un motor eléctrico. Fuente: predictto.com.	47
Gráfico 4: Modelo espectral. Fuente: seas.es.	85
Gráfico 5: Participación de la minería en el PIB y precio del cobre. Fuente: Banco Central de Chile.	123

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Ingeniería de mantenimiento predictivo. Fuente: shenre.cl.	49
Ilustración 2: Monitoreo correa transportadora Terminal Graneles del Norte (TGN). Fuente: shen-re.cl.	68
Ilustración 3: Monitoreo de estado máquina rotativa. Fuente: new.abb.com.	70
Ilustración 4: Molino SAG. Fuente: ecominingconcepts.cl.	72
Ilustración 5: Plantilla estándar utilizada para la síntesis de las entrevistas. Fuente: Elaboración propia. ...	126
Ilustración 6: Entrevista #1. Fuente: Elaboración propia.	127
Ilustración 7: Entrevista #2. Fuente: Elaboración propia.	128
Ilustración 8: Entrevista #3. Fuente: Elaboración propia.	129
Ilustración 9: Entrevista #4. Fuente: Elaboración propia.	130
Ilustración 10: Entrevista #5. Fuente: Elaboración propia.	131
Ilustración 11: Entrevista #6. Fuente: Elaboración propia.	132
Ilustración 12: Entrevista #7. Fuente: Elaboración propia.	133
Ilustración 13: Entrevista #8. Fuente: Elaboración propia.	134

Índice de tablas

Tabla 1: PHM: posibles contribuciones y/o requerimientos. Fuente: tandfonline.com.	36
Tabla 2: Definición de índices de anomalías para cada estado de salud (HS). Fuente: link.springer.com.	38
Tabla 3: Características de las políticas de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.	94
Tabla 4: Comparación de las políticas de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.	94
Tabla 5: Características de los tipos de mantenimiento predictivo. Fuente: Elaboración propia.	95
Tabla 6: Comparación de los tipos de mantenimiento predictivo. Fuente: Elaboración propia.	95
Tabla 7: Propuesta para la formulación de las entrevistas. Fuente: Elaboración propia.	103
Tabla 8: Principales temas por tratar y tópicos de las entrevistas. Fuente: Elaboración propia.	103
Tabla 9: Participación de la minería en el PIB, a precios corrientes (%). Fuente: Banco Central de Chile.	123

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, especialmente a mi madre Luz Gabriela Del Carmen Manríquez Martínez a quien agradezco profundamente todo al apoyo, dedicación, consejos, preocupación, cariño y amor incondicional que me ha dado durante toda mi vida, ha sido siempre un pilar fundamental, valoro infinitamente todos sus conocimientos, esfuerzos y trabajos, ella es mi mejor ejemplo a seguir, la admiro y respeto profundamente, es por eso que quiero dedicar el presente trabajo de titulación a ella, también decir que ella ha sido siempre mi mayor motivación toda mi vida, especialmente durante estos años de carrera en la universidad, sus palabras siempre han sido la mayor motivación tanto en momentos difíciles como también en momentos de alegría, estoy eternamente agradecido de que ella sea mi madre, ella será siempre mi mejor referente para enfrentar la vida en general, mejorar tanto como persona y como profesional, muchas gracias por todo mamá.

Resumen ejecutivo

En el presente trabajo de investigación se analiza la potencial contribución de la metodología conocida como Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM)¹ dentro de las estrategias de mantenimiento industrial en el mercado minero nacional.

Con ese propósito, se comienza dando a conocer la alta relevancia que tiene la actividad minera en nuestro país, siendo además una de las principales a nivel mundial. Sumado a lo anterior, se establece que las empresas relacionadas a la industria minera deben tener mayor preocupación por el óptimo uso de sus activos², esto debido principalmente al aumento de la complejidad de sus faenas, junto con la necesidad de hacer más eficientes sus procesos para alcanzar mayores estándares de competitividad.

Por otra parte, actualmente la denominada Cuarta Revolución Industrial³, o Industria 4.0, está cambiando la manera en que se llevan a cabo los procesos industriales, esto debido fundamentalmente a la incorporación de las herramientas tecnológicas relacionadas a la inteligencia artificial (AI)⁴, las que al mismo tiempo pueden ser utilizadas para mejorar la gestión de activos⁵ y, particularmente, la gestión del mantenimiento.

Dado lo anterior, el mantenimiento industrial ha evolucionado desde los de tipo correctivo hacia los de tipo preventivo y, posteriormente, a los de tipo predictivo. Es así como la utilización de herramientas propias de la Industria 4.0 en estas labores ha dado origen a lo que se conoce como mantenimiento industrial 4.0.

En este contexto, la metodología PHM aparece como una interesante opción para afrontar los requerimientos actuales de la industria minera nacional, como así también hacer uso de las nuevas tecnologías relacionadas la inteligencia artificial (AI).

1 Son las siglas de Prognostics and Health Management (PHM).

2 Un activo, según la norma ISO 55.000:2014, se define como un ítem, objeto o entidad que tiene valor real o potencial para una organización.

3 La Cuarta Revolución Industrial, también conocida como Industria 4.0, corresponde a un término que fue acuñado por el gobierno alemán para definir lo que es la fábrica inteligente.

4 Son las siglas de artificial intelligence (AI).

5 La gestión de activos consiste en obtener el máximo rendimiento de los bienes o recursos, es decir, de todo aquello que tenga valor para una organización.

Para validar esta idea, se analiza el mercado de mantenimiento industrial en nuestro país, caracterizando la oferta y describiendo la demanda de estos servicios. Luego, se analiza en profundidad las características de la metodología PHM, junto con modelos de propuestas de valor⁶ que contribuyan a dar respuestas a las necesidades detectadas.

Posteriormente, se hace un análisis comparativo que sirve para establecer las diferencias y elementos disruptivos que posee, con respecto a la oferta actual de mantenimiento industrial, la metodología PHM. En este sentido, se destaca la incorporación de los conceptos de estado de salud (HS)⁷ de los activos y el de vida útil remanente (RUL)⁸.

La investigación se complementa con entrevistas a partes interesadas⁹ de la industria minera nacional, esto con la finalidad de contrastar lo previamente indagado versus la experiencia y visión que estas partes interesadas tienen respecto a tópicos relacionados a mantenimiento industrial.

Entre los posibles beneficios de la implementación de la metodología PHM se encuentra la disminución de costos asociados a detenciones no programadas, el mejoramiento de la toma de decisiones relacionadas a temas de mantenimiento, mayor uso del potencial de las herramientas propias de la Industria 4.0, automatización de operaciones, entre otros.

Todo lo anterior, contribuye a la eficiencia de los procesos industriales y, con ello, al aumento del nivel de competitividad de las empresas, lo que puede sentar las bases para convencer a los tomadores de decisiones a invertir en la aplicación de la metodología PHM.

Finalmente, se concluye que existen expectativas positivas respecto al impacto real que puede tener la implementación de la metodología PHM en el contexto del mantenimiento industrial dentro del mercado minero nacional, debido precisamente a las características diferenciadoras y disruptivas que esta metodología tiene con respecto a las frecuentemente utilizadas hasta ahora por parte de las empresas que integran este sector de la economía y que valoran las bondades de estas nuevas tecnologías.

6 En la administración y el marketing, una propuesta de valor es una estrategia empresarial que maximiza la demanda a través de configurar óptimamente la oferta. Selecciona y jerarquiza los beneficios específicos de un bien o servicio que son más valorados por la demanda, haciéndolos asequibles y replicables según las capacidades y disposiciones de la empresa que los ofrece.

7 Son las siglas de health state (HS).

8 La vida útil remanente (remaining useful life) (RUL) se define como la estimación del periodo de tiempo en que un activo seguirá cumpliendo su propósito de forma rentable antes de necesitar ser reemplazado.

9 Los participantes, partes interesadas, interesados o stakeholders son personas, organizaciones o empresas que tienen algún tipo de participación interna o externa en una empresa u organización dada.

Introducción

La minería representa una de las actividades económicas más importantes de nuestro país, su contribución en el producto interno bruto (PIB)¹⁰ siempre resulta considerable, incluso en momentos complejos de nuestra economía. La producción de cobre de nuestro país es la más relevante a nivel global, siendo sus yacimientos a tajo abierto de los más complejos y de mayor actividad en el mundo. Actualmente, sumado a lo anterior, existen enormes potencialidades relacionadas con los yacimientos de litio en nuestro país, lo que de ser aprovechado podría traer considerables beneficios para el conjunto de la economía interna.

Además, la industria minera ha generado un gran ecosistema de empresas¹¹ proveedoras de bienes y servicios a la gran minería, por lo tanto, existen razones más que suficientes para considerar a la minería como uno de los ejes centrales de la economía local.

Dicho lo anterior, se puede visualizar que esta gran actividad económica debido a su potencial crecimiento y, con ello, aumento de su complejidad operativa, necesita de herramientas que generen mayor eficiencia a sus procesos, lo que eventualmente puede traducirse en mayor competitividad a nivel nacional como internacional.

Con ese propósito, la gestión de activos aparece como una de las grandes preocupaciones de esta industria, debido al alto volumen de activos fijos¹² que maneja y la necesidad de velar por su correcto desempeño en las operaciones.

Otro factor por considerar es la alta intensidad a la que son sometidos los activos empleados en las actividades mineras, lo que hace que sus ciclos de vida¹³ se pongan a prueba, esto debido a que la degradación de cada uno de estos equipos puede acelerarse conforme las metas de producción sean más exigentes para satisfacer las demandas de los mercados nacionales e internacionales. Es así como el mantenimiento industrial se vuelve un factor clave a la hora de querer mejorar los indicadores propios de la gestión de activos.

10 El producto interno bruto (PIB) es el valor total de los bienes y servicios producidos en el territorio de un país en un periodo determinado, libre de duplicaciones.

11 Un ecosistema de empresas o ecosistema empresarial es la red de organizaciones, incluidos proveedores, distribuidores, clientes, competidores, agencias gubernamentales, entre otros, que participan en la entrega de un bien o servicio específico a través de la competencia y la colaboración.

12 Un activo fijo es un bien de una empresa, ya sea tangible o intangible, que no puede convertirse en líquido a corto plazo y que normalmente son necesarios para el funcionamiento de la empresa.

13 El ciclo de vida es el proceso vital de un organismo desde su nacimiento hasta su muerte. De manera general, el ciclo de vida está dividido en cuatro etapas: nacimiento, desarrollo, reproducción y muerte. Estas fases de un ciclo de vida son aplicables a todas las personas y cosas.

En particular, la gestión del mantenimiento debe constantemente replantearse sus estrategias para lograr mejores desempeños de las maquinarias, tratar de anticiparse a las fallas y monitorear constantemente el estado en que se encuentran.

Por otra parte, en el presente siglo ha nacido lo que se conoce como Cuarta Revolución Industrial, o también conocida como Industria 4.0, cuya característica principal es el desarrollo de herramientas tecnológicas a partir de la inteligencia artificial (AI), lo que va en apoyo de las diversas actividades económicas que, por un lado, pueden lograr una automatización de sus procesos y, por otro, utilizar al máximo las potencialidades de internet, logrando una interconexión entre los distintos activos de las empresas.

La necesidad de volver más eficientes las actividades de la minería para velar por la competitividad de estas, afrontar la mayor complejidad de sus procesos y aumentar el desempeño de los activos, hacen que una de las preocupaciones centrales de la minería apunte al mantenimiento de sus maquinarias.

Por otro lado, el contexto global en donde la posibilidad de incorporar las tecnologías propias de la Industria 4.0 a las actividades habituales de las organizaciones, junto con los beneficios que aquello conlleva, hacen que las distintas industrias, dentro de las que se encuentra la industria minera, tengan que prestar atención a esta tendencia mundial, considerando invertir en estas, adaptarse a los cambios e incorporarlas a sus procesos.

Para abordar tanto los desafíos de los nuevos requerimientos en materia de mantenimiento industrial, así como además de incorporar las herramientas de la Industria 4.0, se ha generado lo que se conoce como mantenimiento industrial 4.0, cuyo propósito es mezclar ambas preocupaciones y otorgar las metodologías para llevarlas a cabo.

En este contexto, una de las metodologías que asoma como más ventajosas para satisfacer estos requerimientos es la denominada como Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM), la que incorpora distintas herramientas de metodologías anteriores, así como además las virtudes de las tecnologías propias de la Industria 4.0, incorporando a la gestión del mantenimiento los desarrollos más recientes en torno a la inteligencia artificial (AI).

En el presente trabajo de investigación, se analizan los potenciales beneficios que la implementación de la metodología PHM puede tener dentro de las actividades del mercado minero nacional, esto a partir del mejoramiento de sus estrategias de mantenimiento industrial, contribuyendo de esa manera al aumento de su eficiencia y, con ello, al mejoramiento de la competitividad de las empresas partícipes de ese sector de la economía.

1. Antecedentes generales

1.1. Planteamiento del problema

Hoy por hoy, según la multinacional Aggity¹⁴, las empresas a nivel mundial a fin de ganar eficiencia y competitividad han tenido que sumarse gradualmente a lo que se conoce como la Cuarta Revolución Industrial, esta implica la digitalización de los procesos de producción, generando con ello lo que se conoce como Industria 4.0 (Aggity, 2021).

Sumado a lo anterior, se establece que el mantenimiento industrial es una parte esencial de cualquier negocio, una avería puede ser catastrófica ya que no solo implica un gran gasto de dinero, además implica la detención del proceso de producción industrial (Melo, 2020), según la empresa nacional DataScope¹⁵.

En este sentido, tradicionalmente las empresas han trabajado con planes de mantenimiento de tipo correctivo y preventivo, sin embargo, el incremento del consumo, las estrategias de optimización del uso de los activos y la aparición de negocios disruptivos que aumentan la competencia han hecho que las empresas necesiten optimizar sus estrategias de mantenimiento (Segarra, 2021), según Sigma Industrial Precision¹⁶. De esta manera, el mantenimiento ha evolucionado hasta dar paso al mantenimiento predictivo, utilizando para ello todo el potencial de las nuevas tecnologías de la Industria 4.0.

La Industria 4.0 se fundamenta en el hecho de que las maquinarias ya están conectadas a internet, lo que se traduce en que cada parte del proceso de producción industrial interactúa con las demás para adaptarse a las circunstancias y lograr un rendimiento óptimo en todo momento, esto significa que no es necesario realizar intervenciones en la maquinaria para poder tomar medidas de estos parámetros físicos, constituyendo, todo lo anteriormente señalado, la gran ventaja del mantenimiento industrial 4.0.

Por otro lado, en Chile se ha estimado que los gastos en mantenimiento pueden llegar a representar entre un 20% y un 50% de los costos de producción en las industrias (Portal Minero, 2014), a lo que se suma el hecho de que los sistemas productivos en manufactura y minería se encuentran constantemente bajo estrés, debido principalmente a la necesidad de cumplimiento de metas de producción y reducción de costos.

14 Aggity es una multinacional española de tecnología especializada en transformación digital de los negocios.
15 DataScope es una empresa chilena de software que ofrece soluciones móviles para recolectar información en terreno. Se encuentra disponible en más de 100 países.

16 Sigma Industrial Precision es una empresa española especializada en el desarrollo de mantenimiento predictivo basado en análisis eléctrico.

Antecedentes generales

Ahora bien, centrándose en la industria minera, Maurizio Edwards, Académico de la Universidad de Santiago y asesor en materias de mantenimiento, ha indicado que las principales problemáticas que presenta la industria minera nacional en general es la falta de rigurosidad en materias de mantenimiento, señalando que *“Las empresas de clase mundial hacen lo necesario para agregar valor a través del trabajo de mantenimiento, en cambio en Chile se da lo contrario, hay un sobre-mantenimiento o falta de ello, lo que significa intervenir de manera poco eficiente en términos de los recursos que cuenta cada empresa”* (Portal Minero, 2014).

Por otra parte, dentro de las propuestas metodológicas para llevar a cabo el mantenimiento predictivo, y considerando el contexto actual de creciente sensorización, el desarrollo de las técnicas relacionadas al concepto de Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM) se han presentado como una opción interesante para que las empresas las incorporen a sus sistemas de mantenimiento, *“siendo el proceso de pronóstico uno de los temas principales de desarrollo a nivel mundial, y que permite a las empresas planificar acciones de mantenimiento que permitan evitar o disminuir los impactos negativos en una compañía”*, según Viviana Meruane, Directora del IMA+¹⁷ y del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile (Portal Minero, 2020).

Se considera que la metodología PHM debe ser un tema relevante para la industria, esto debido a que es una tecnología transversal, lo anterior en cuanto se estima que el estar analizando el estado de salud de un sistema es una necesidad de cualquier proceso productivo: la industria del papel, producción de gas natural, industria minera, entre otros.

Los beneficios de la metodología PHM son notorios, siendo su impacto directo y a corto plazo, esto debido a que *“gracias a la implementación de una estrategia PHM se evitan inspecciones costosas e innecesarias”*, tal como lo sostiene Marcos Orchard, Académico del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile e investigador reconocido por la PHM society¹⁸ con el premio *“PHM society fellow”* (Revista ElectroIndustria, 2009).

17 El Programa de Innovación en Manufactura Avanzada (IMA+) es un consorcio tecnológico conformado por instituciones académicas y empresariales cuya misión es generar, de forma continua, soluciones de manufactura avanzada personalizadas, asequibles e interoperables para los problemas específicos de la industria chilena, a través de la articulación de las capacidades existentes en las universidades, los centros de investigación y las empresas.

18 The Prognostics and Health Management Society (PHM Society) es una organización sin fines de lucro dedicada al avance del PHM como disciplina de ingeniería. Su sede principal se encuentra en Rochester, New York, Estados Unidos. Fue fundada el año 2009.

Antecedentes generales

Dado los anteriores antecedentes, se visualiza la necesidad en nuestro país de que las empresas en general estén abiertas a la posibilidad de modernización de sus tecnologías utilizadas en los procesos productivos a través de las herramientas de la Industria 4.0, así como además de poner atención a establecer mejoras en sus planes de mantenimiento haciendo uso precisamente de estas herramientas.

La presente memoria analiza el modelo PHM como una opción que permita a las empresas nacionales, en particular las relacionadas a la industria minera, por una parte, hacer uso de las virtudes de las herramientas propias de la Industria 4.0 y, al mismo tiempo, a través de estas, mejorar sus planes de mantenimiento.

En consecuencia, se busca establecer el impacto de esta metodología como factor que potencie la eficiencia y competitividad de las empresas del mercado minero nacional, lo que podría llevar a que estas tengan motivación por invertir en estas tecnologías.

Por lo tanto, dadas las necesidades de modernización tecnológica de las empresas y el mejoramiento de los planes de mantenimiento para, entre otras razones, aminorar los costos asociados a mantenimiento, se busca evaluar a la metodología PHM en cuanto su potencial contribución para dar respuestas satisfactorias a los requerimientos de la industria minera nacional.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Analizar el potencial impacto de la aplicación de la metodología PHM dentro de las estrategias de mantenimiento industrial para aumentar la eficiencia y competitividad de las empresas relacionadas al mercado minero nacional.

1.2.2. Objetivos específicos

- Conocer las principales temáticas de la Industria 4.0.
- Describir las implicancias del mantenimiento industrial 4.0.
- Estudiar las principales problemáticas presentes en la industria minera nacional relacionadas a mantenimiento industrial.
- Identificar los factores diferenciadores de la metodología PHM respecto a las tradicionalmente relacionadas a mantenimiento industrial.
- Describir casos de éxito de aplicación de la metodología PHM en el mundo dentro del contexto del mantenimiento industrial.
- Determinar las ventajas de la metodología PHM frente a las frecuentemente utilizadas en la oferta de planes de mantenimiento para el sector minero nacional.
- Analizar la potencial contribución de la metodología PHM en el mejoramiento de la eficiencia y competitividad de las empresas relacionadas al mercado minero nacional.

1.3. Justificación

En Chile, la minería participa en forma relevante en la economía nacional. Por ejemplo, durante el año 2020, a pesar de la pandemia causada por el COVID-19, que afectó dramáticamente al mundo en general, y a Chile en particular, la minería se mantuvo como uno de los principales pilares económicos del país, esto reflejado en una participación de un 12,5% en el PIB nacional, según el Anuario de la Minería de Chile 2020¹⁹, y en este la participación de la minería del cobre fue de un 11,2%²⁰. Chile, como mayor productor y exportador de cobre en el mundo, produjo 5.773 mil toneladas métricas²¹ en el año 2020, lo que equivale al 28,5% de la producción mundial de ese año.

Por otra parte, según un estudio realizado por el Departamento de Ingeniería de Minería de la Pontificia Universidad Católica de Chile (Carrasco & Pascual, 2014), los costos de mantención de equipos representan entre un 15% y un 70% del total de los costos de un proceso productivo. En el caso de la minería, esa componente oscila entre un 20% y un 35%.

Si se utiliza la producción de cobre como referencia dentro de la industria minera, se puede mencionar que los costos de producción de las empresas de la gran minería del cobre aumentaron en un 8,1% durante el año 2021 respecto al año 2020 (COCHILCO, 2022), de acuerdo con el análisis del Observatorio de Costos de la Gran Minería del Cobre elaborado por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO)²².

Por lo tanto, se establece que existe una manifiesta necesidad de generar mejoras en la gestión de activos a fin de disminuir los costos de producción de la industria minera. En particular, se estima que una correcta política de mantenimiento tiene un alto potencial para impactar de manera positiva en el desempeño de los negocios asociados al sector minero local y, de paso, la producción nacional.

Si bien existen distintas formas de minimizar los costos de mantención, en la presente memoria se analiza el potencial impacto de la metodología PHM dentro de las políticas de mantenimiento, contribuyendo a los requerimientos que sean detectados en el mercado minero nacional a fin de afrontar los desafíos presentes en esta industria.

19 Este documento fue elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), dependiente del Ministerio de Minería.

20 Ver Anexo 1.

21 Una tonelada métrica (t), también conocida como tonelada, es una unidad de masa en el sistema métrico de unidades. Se acepta para su uso en el Sistema Internacional de Unidades (SI), pero no es una unidad SI. Sus equivalencias fundamentales con otras unidades de masa son: 1 tonelada métrica = 1.000 kg = 2.204,622 lb.

22 La Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) es un organismo técnico del Estado de Chile. Su función es asesorar al gobierno en materias relacionadas con la producción de cobre y sus subproductos, además de todas las sustancias minerales metálicas y no metálicas, exceptuando el carbón y los hidrocarburos.

1.4. Alcances

La presente memoria pretende dar a conocer los aspectos más relevantes de la denominada Industria 4.0 y el impacto que los conocimientos asociados a ella han tenido en la gestión de activos, dando una nueva perspectiva y visión de la gestión del mantenimiento, generando con ello lo que se conoce como mantenimiento industrial 4.0.

Para abordar este nuevo concepto, existen distintas propuestas metodológicas, sin embargo, en este trabajo se indagará en las potencialidades que tiene la metodología conocida como Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM) para afrontar las preocupaciones, problemáticas o requerimientos que sean detectados dentro del mercado minero nacional.

Para cumplir con ese propósito, se caracterizará a la metodología PHM para visualizar sus ventajas, estableciendo con ello sus potenciales virtudes dentro del contexto del mantenimiento industrial, contribuyendo de esa manera en las actividades, procesos u operaciones habituales relacionadas a la industria minera, a fin de cumplir con las exigencias de eficiencia y competitividad por parte de este sector de la economía.

La indagatoria mencionada se abordará por medio de las señales que muestre el mercado en cuanto a los productos relacionados a mantenimiento industrial demandados habitualmente por empresas del rubro minero, además, se contempla el desarrollo de entrevistas con el propósito de comprender, de manera directa, el potencial interés que puede surgir en la aplicación de la metodología PHM dadas las temáticas o soluciones que se manifiesten como más valoradas por partes interesadas.

2. Marco teórico

2.1. Aspectos generales

La estructura que se propone para el marco teórico pretende dar a conocer los principales conceptos relacionados a la denominada Industria 4.0, así como además su relación actual con la gestión de activos y, puntualmente, con el mantenimiento industrial.

Por otra parte, se busca caracterizar a la gestión de activos, haciendo la diferenciación necesaria con la gestión del mantenimiento, a fin de comprender los reales alcances de ambos conceptos y su grado de vinculación con el mantenimiento industrial. En este sentido, se debe tener presente que la gestión de activos corresponde a un tema más amplio que abarca distintas actividades empresariales dentro de las que se pueden contemplar las relacionadas al mantenimiento de activos fijos.

Posteriormente, se aborda lo referente al mantenimiento industrial, las políticas de mantenimiento, y su relación con las herramientas propias de la Industria 4.0 dando origen al denominado mantenimiento industrial 4.0.

Finalmente, se ahonda en el concepto de Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM), dando a conocer sus principales características, así como también casos de estudio de implementaciones concretas de esta metodología.

2.2. Industria 4.0

2.2.1. Qué es la Industria 4.0

Según la empresa Deloitte²³, la Cuarta Revolución Industrial, también conocida como Industria 4.0, es una etapa de la historia que está cambiando la forma en que los negocios operan y, por lo tanto, los entornos en los que se ven obligados a competir (Deloitte, 2018).

La Industria 4.0 implica llevar a cabo la promesa de una nueva revolución que combina técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes las que se pretenden integrar a las personas, organizaciones y, naturalmente, a sus activos.

Esta revolución se encuentra marcada por la aparición de nuevas tecnologías como la robótica, la analítica, la inteligencia artificial (AI), las tecnologías cognitivas, la nanotecnología, el internet de las cosas (IoT)²⁴, entre otros.

Las organizaciones deben identificar las tecnologías que mejor satisfacen sus necesidades con el fin de invertir en ellas. Según Deloitte, se establece que las empresas que no comprenden los cambios y oportunidades que trae consigo la Industria 4.0, corren el riesgo de perder cuota de mercado. Es altamente relevante comprender el potencial de la Cuarta Revolución Industrial dado que no solo afectará a los procesos de fabricación. Su alcance es mucho más amplio, afectando a todas las industrias y sectores e incluso a la sociedad.

La Industria 4.0 puede mejorar las operaciones de los diversos negocios y, con ello, el crecimiento de los ingresos, transformando los productos, la cadena de suministro²⁵ y las expectativas de los clientes. Por otro lado, también puede generar cambios en la fuerza laboral, dado que potencialmente se requerirá de nuevas capacidades y roles de parte de las personas (Deloitte, 2018).

23 Según su propio sitio web, Deloitte es la marca en la que decenas de miles de dedicados profesionales, en firmas independientes alrededor del mundo, colaboran para proveer servicios de auditoría, consultoría, asesoría financiera, asesoría de riesgo, impuestos y servicios relacionados a los requerimientos de sus clientes.

24 Son las siglas de internet of things (IoT).

25 La cadena de suministro (supply chain) es el proceso que se genera desde que el cliente realiza un pedido hasta que el producto o servicio ha sido entregado y cobrado.

Además, las tecnologías relacionadas con la Industria 4.0 pueden generar productos completamente nuevos. El uso de sensores y dispositivos portátiles, en análisis y la robótica, entre otros, permitirán mejoras en los productos de diversas maneras, desde la creación de prototipos y pruebas hasta la incorporación de conectividad a productos previamente desconectados. Estos cambios en los productos se pueden traducir, al mismo tiempo, en cambios en la cadena de suministro y, consecuentemente, en los clientes.

Finalmente, los impactos de la Industria 4.0 pueden expresarse fundamentalmente en tres niveles (Deloitte, 2018):

- **Nivel individual:** La Industria 4.0 puede significar diferentes cosas tanto para colaboradores como para clientes. Por ejemplo, para los colaboradores puede significar un cambio en el trabajo que van a realizar, mientras que para los clientes podría traducirse en una mayor personalización en los productos que satisfagan mejor sus necesidades.
- **Nivel organizacional:** La capacidad de ajustarse y aprender de los datos en tiempo real puede hacer que las organizaciones sean más receptivas, proactivas y predictivas. Asimismo, permite a la organización reducir sus riesgos en materia de productividad.
- **Nivel de ecosistemas:** Además del cambio en la forma en que las empresas operan y en la producción de bienes, la Industria 4.0 afecta a todos los agentes del ecosistema, es decir, a proveedores, clientes, consideraciones regulatorias, inversionistas, entre otros. Se estima que estas tecnologías permiten interacciones entre cada punto de una red.

2.2.2. Conceptos asociados a la Industria 4.0

Existen diversos conceptos asociados a la Industria 4.0. A continuación, se presentan algunos de ellos, junto con una breve descripción.

- ***Tecnología digital***

Las tecnologías digitales son herramientas, sistemas, dispositivos y recursos electrónicos que generan, almacenan o procesan datos. Según la empresa Crandi²⁶, las tecnologías digitales permiten desarrollar sistemas que automatizan una o varias tareas de un proceso. Estos sistemas emiten instrucciones que llegan a artefactos digitales en forma de datos y/o números (Academia Crandi, 2020).

26 Crandi es una consultora de marketing digital con más de 20 años de trayectoria.

- ***Tecnología de la información (TI)***

Las tecnologías de la información (TI) son todas aquellas herramientas digitales o programas informáticos que permiten compartir, transmitir, administrar, tratar, recopilar datos o información, esto según Epitech²⁷. Con frecuencia, son utilizadas por organizaciones y empresas para sus negocios (Monster Digital Agency, 2022). Las tecnologías de la información y comunicación (TIC) son una integración de las tecnologías de la información con la finalidad de favorecer y permitir la comunicación de manera electrónica.

- ***Tecnología operativa (TO)***

La tecnología operativa (TO) es el uso de hardware y software para monitorear y controlar los procesos físicos, los dispositivos y la infraestructura, según Fortinet²⁸. Los sistemas de tecnologías operativas se encuentran en una amplia gama de sectores con alta utilización de activos (Fortinet, 2022), realizando una gran variedad de tareas que van desde el monitoreo de infraestructura crítica hasta el control de robots en una planta de fabricación.

- ***Sistemas de información***

Un sistema de información es un conjunto de componentes interrelacionados que trabajan juntos para recopilar, procesar, almacenar y difundir información para apoyar la toma de decisiones, según la empresa KIO Networks²⁹. Además, apoyan la coordinación, control, análisis y visualización de una organización (KIO Networks, 2022).

- ***Sistemas ciberfísicos***

Un sistema ciberfísico, según la empresa Tekniker³⁰, integra capacidades de computación, almacenamiento y comunicación junto con capacidades de seguimiento y/o control de objetos en el mundo físico. Los sistemas ciberfísicos están, normalmente, conectados entre sí y a su vez conectados con el mundo virtual de las redes digitales globales (Tekniker, 2022).

27 Según su propio sitio web, Epitech es una escuela superior de informática fundada el año 1999. Permite convertir la pasión por la informática en una profesión de futuro gracias a su pedagogía innovadora basada en la realización de proyectos.

28 Fortinet es una empresa multinacional de Estados Unidos con sede en Sunnyvale, California. Se dedica al desarrollo y la comercialización de software, dispositivos y servicios de ciberseguridad, como firewalls, antivirus, prevención de intrusiones y seguridad en dispositivos de usuario, entre otros.

29 Fundada en 2002, KIO Networks es una empresa mexicana que ofrece una amplia gama de servicios de tecnología de información de misión crítica que garantiza a sus clientes la operación eficiente de sus operaciones de TI a través de la implementación, operación y gestión de sus sistemas.

30 Tekniker es un centro tecnológico especializado en fabricación avanzada, ingeniería de superficies, ingeniería de producto y TICs para fabricación.

- ***Inteligencia artificial (AI)***

La reconocida empresa Microsoft³¹ define a la inteligencia artificial (AI) como la capacidad de un sistema informático³² de imitar funciones cognitivas humanas, como el aprendizaje y la solución de problemas. Un sistema informático con inteligencia artificial (AI) hace predicciones o realiza acciones basándose en los patrones de los datos disponibles y puede aprender de sus errores para ser más preciso (Microsoft, 2022).

- ***Internet de las cosas (IoT)***

El internet de las cosas (IoT), según la empresa Secmoti³³, es la tecnología mediante la cual cualquier objeto puede conectarse y compartir información y datos a través de internet. El internet de las cosas (IoT) comprende un sistema de dispositivos interrelacionados y conectados. Estos dispositivos tienen la capacidad de transferir datos e información mediante una red sin necesidad de la intervención humana (Uribe, 2021).

- ***Inteligencia artificial de las cosas (AIoT)***

Como se puede imaginar por su nombre, la inteligencia artificial de las cosas (AIoT)³⁴ hace referencia a la combinación de las tecnologías AI e IoT. Esta tecnología, según la empresa Secmoti, se encarga básicamente de dotar a los dispositivos conectados, mediante IoT, de una autonomía basada en AI que les permita analizar situaciones y tomar decisiones. El objetivo principal de esta tecnología es conseguir maximizar los beneficios del IoT apoyándose en la AI (Uribe, 2021).

31 Microsoft Corporation es una empresa tecnológica multinacional con sede en Redmond, Washington, Estados Unidos. Microsoft es un acrónimo de microordenador y software. La empresa desarrolla, fabrica, licencia y da soporte a ordenadores personales, servidores, dispositivos electrónicos y servicios.

32 Un sistema informático es un sistema que permite almacenar y procesar información, es el conjunto de partes interrelacionadas: hardware, software y personal informático.

33 Secmoti es una empresa, con origen en Sevilla, España, dedicada al desarrollo de soluciones tecnológicas bajo el paradigma de la innovación y la seguridad de la información.

34 Son las siglas de artificial intelligence of things (AIoT).

- ***Aprendizaje automático (machine learning)***

El aprendizaje automático es una forma de la inteligencia artificial (AI) que permite a un sistema aprender de los datos en lugar de aprender mediante la programación explícita, según la empresa IBM³⁵. Conforme un algoritmo³⁶ ingiere datos de entrenamiento, es posible producir modelos más precisos basados en datos. Un modelo de aprendizaje automático es la salida de información que se genera cuando entrena su algoritmo con datos (IBM, 2022).

- ***Aprendizaje profundo (deep learning)***

El aprendizaje profundo es un subconjunto del aprendizaje automático, que a su vez es parte de la inteligencia artificial (AI), donde las redes neuronales (NN)³⁷, algoritmos inspirados en cómo funciona el cerebro humano, aprenden de grandes cantidades de datos, según la empresa IBM. Los algoritmos de aprendizaje profundo realizan una tarea repetitiva que ayuda a mejorar de manera gradual el resultado, lo que permite el aprendizaje progresivo. Este proceso forma parte de una familia más amplia de métodos de aprendizaje automático basados en redes neuronales (NN) (IBM, 2022).

- ***Redes neuronales artificiales***

Las redes neuronales artificiales (ANN)³⁸, más comúnmente conocidas como redes neuronales (NN), son sistemas informáticos inspirados en las redes neuronales biológicas que constituyen el cerebro humano, según la empresa TIBCO³⁹. Es imposible hablar de redes neuronales (NN) sin mencionar el aprendizaje profundo. Ambos términos a menudo se usan indistintamente, aunque son distintos entre sí. Sin embargo, los dos están estrechamente conectados ya que uno depende del otro para funcionar. Si las redes neuronales (NN) no existieran, tampoco existiría el aprendizaje profundo (TIBCO, 2022).

35 IBM (International Business Machines Corporation) es una reconocida empresa multinacional estadounidense de tecnología y consultoría con sede en Armonk, New York.

36 En matemáticas, lógica, ciencias de la computación y disciplinas relacionadas, un algoritmo es un conjunto de instrucciones o reglas definidas y no ambiguas, ordenadas y finitas que permite, típicamente, solucionar un problema, realizar un cómputo, procesar datos y llevar a cabo otras tareas o actividades.

37 Son las siglas de neural network (NN).

38 Son las siglas de artificial neural network (ANN).

39 TIBCO (The Information Bus Company) es una empresa estadounidense de software de inteligencia comercial fundada en 1997 en Palo Alto, California.

- ***Ciencia de datos (data science)***

La ciencia de datos es el término utilizado para el proceso que busca extraer grandes cantidades de datos para determinar patrones repetitivos. Esto ayuda a organizar y controlar todos los aspectos variables de una organización como, por ejemplo, los costos, la competencia y el mercado. Se encarga de estudiar el origen de la información, lo que representa y las formas que existen para emplearla a beneficio de cualquier proyecto, según MBIT School⁴⁰. La principal ventaja de esta técnica es que, con una buena organización, es posible resolver problemas de forma más rápida y objetiva. Además, es la mejor manera de encontrar soluciones a circunstancias con datos variados y dispersos (MBIT School, 2022).

- ***Macrodatos (big data)***

Los macrodatos es el término que describe el gran volumen de datos, ya sean estructurados o no estructurados, que forman parte de las empresas. Los macrodatos, según Valuekeep⁴¹, pueden ser útiles en la búsqueda de insights⁴² para optimizar la toma de decisiones y mejorar las estrategias de negocios (Valuekeep, 2022).

- ***Base de datos en la nube***

Una base de datos en la nube es un servicio de base de datos creado y accedido por medio de una plataforma en la nube⁴³, esto según la empresa de tecnología IBM. Sirve a muchas de las mismas funciones que una base de datos tradicional, con la flexibilidad añadida de la computación en la nube. Para implementar la base de datos, los usuarios instalan el software en una infraestructura en la nube (IBM, 2022).

40 MBIT School (Madrid Business Intelligence Technology) es una escuela técnica de referencia en ciencia de datos, macrodatos e inteligencia artificial aplicada a los negocios. Especializada en formación ejecutiva en análisis avanzado, inteligencia comercial y macrodatos.

41 Valuekeep es un software de gestión de mantenimiento en la nube cuya principal función es que las empresas de cualquier sector puedan llevar a cabo sus operaciones de mantenimiento de forma más eficiente y rentable. Valuekeep es parte del Grupo Primavera, el mayor grupo ibérico de soluciones de gestión, que reúne a las mejores empresas tecnológicas portuguesas y españolas.

42 Un insight hace referencia a los datos concretos que aportan una información valiosa para la optimización general, un ejemplo de insight puede ser detectar un patrón de comportamiento en el consumidor, habitualmente estos puntos concretos solo pueden ser vistos por expertos en macrodatos.

43 La nube hace referencia a los servidores a los que se accede a través de internet, y al software y bases de datos que se ejecutan en esos servidores. Los servidores de la nube están ubicados en centros de datos por todo el mundo. Con la informática en la nube, no es necesario que los usuarios y las empresas gestionen los servidores físicos ni que ejecuten aplicaciones de software en sus propios ordenadores.

- ***Computación en la nube (cloud computing)***

La computación en la nube es la provisión de servicios de computación, incluyendo servidores, almacenamiento, bancos de datos, red, software, análisis e inteligencia, por internet, de modo de ofrecer innovaciones más rápidas, recursos flexibles y economías de escala, según la definición de Valuekeep (Valuekeep, 2022).

- ***Computación de borde (edge computing)***

La reconocida empresa de tecnología IBM establece que el concepto de computación de borde es una infraestructura de informática distribuida que acerca las aplicaciones empresariales a los orígenes de los datos, como dispositivos de internet de las cosas (IoT) o servidores periféricos locales. Esta proximidad a los datos en su origen puede ofrecer grandes ventajas para los negocios como, por ejemplo, conocimientos más rápidos, tiempos de respuesta mejorados y mayor disponibilidad del ancho de banda (IBM, 2022).

- ***Procesamiento de datos en tiempo real***

El procesamiento de datos en tiempo real, según la reconocida empresa Microsoft, se define como el procesamiento de flujos no asociados de datos de entrada, con requisitos de latencia muy cortos para el procesamiento, que se miden en milisegundos o segundos. Uno de los grandes desafíos de las soluciones de procesamiento en tiempo real es ingerir⁴⁴, procesar y almacenar mensajes en tiempo real y en grandes volúmenes (Microsoft, 2022).

- ***Fábrica inteligente (smart factory)***

Según la compañía ViewSonic⁴⁵, las fábricas inteligentes son aquellas que ponen énfasis en la optimización y adaptación de carácter complejo. A través de la interconexión que posibilita el internet de las cosas (IoT) y otros sistemas ciberfísicos, teniendo a la eficiencia en mente, las fábricas inteligentes pueden integrarse con el resto de la cadena de suministro, lo que permite, de esta manera, alterar y mejorar el proceso en tiempo real. En la práctica, se estima que el mayor activo de una fábrica inteligente es su integración con la inteligencia artificial (AI) (Wang, 2020).

⁴⁴ El término ingerir se define como el proceso de absorber datos de una variedad de fuentes y transferirlos a un sistema de almacenamiento y análisis.

⁴⁵ ViewSonic Corporation, con sede en Brea, California, Estados Unidos, es un proveedor de soluciones de informática, electrónica para consumidores y comunicaciones líder en el mundo.

- ***Gemelo digital (digital twin)***

Un gemelo digital es una representación virtual de un objeto o sistema que abarca su ciclo de vida, se actualiza a partir de datos en tiempo real y utiliza simulación, aprendizaje automático y razonamiento para ayudar en la toma de decisiones, esto según la definición de la empresa IBM. En otras palabras, un gemelo digital es un modelo virtual diseñado para reflejar con precisión un objeto físico (IBM, 2022).

- ***Ciberseguridad***

La ciberseguridad es la práctica de proteger los sistemas importantes y la información confidencial de los ataques digitales. También conocida como seguridad de la tecnología de la información (TI), las medidas de ciberseguridad o seguridad cibernética están diseñadas para combatir las amenazas contra sistemas en red y aplicaciones, ya sea que esas amenazas se originen dentro o fuera de una organización. Todo lo anterior, corresponde a la definición de ciberseguridad de parte de la empresa IBM (IBM, 2022).

2.2.3. Perspectivas de inversión relacionada a la Industria 4.0

En este punto, son variadas las investigaciones al respecto. A continuación, se mencionarán algunas de ellas.

Según la investigación titulada *"Industry 4.0: rising to the challenge"* de la organización Siemens Financial Services⁴⁶ en el año 2020, se estima que el desafío de inversión global para la transformación digital de las industrias será de alrededor de US\$400 mil millones en los próximos 5 años⁴⁷. En la investigación se destaca que *"Hoy, invertir en transformación digital constituye la diferencia entre sobrevivir y prosperar para las empresas, aún más en vista de la reciente incertidumbre económica"* (Siemens, 2020).

46 Siemens Financial Services (SFS) es una división de Siemens. La sede global de la compañía se encuentra en Múnich, Alemania. SFS ofrece soluciones financieras internacionales en el área de negocio a negocio.

47 Contados desde el año 2020, año de la investigación.

Marco teórico

En un estudio, realizado en el año 2020, de la empresa Nokia⁴⁸ y la firma de investigación ABI Research⁴⁹ sobre tendencias de inversión tecnológica en la industria manufacturera, un 74% de los tomadores de decisiones (de cerca de 600 empresas encuestadas) tenía planes para actualizar las tecnologías de comunicaciones y las redes de control en los próximos 2 años⁵⁰. Un 90% de estas empresas se encontraba investigando las posibilidades que ofrece el 5G a sus actividades. Un 51% estimaba necesario aplicar la robótica para lograr una mayor automatización, y un 42% para mejorar la productividad de los empleados a través de las nuevas tecnologías (Nokia & ABI Research, 2020).

Según un estudio realizado por IDC⁵¹, a través de una encuesta a más de 400 empresas industriales, Lorenzo Veronesi, Director de Investigación en IDC Manufacturing Insights EMEA, expresó que *“IDC espera que, a fin de hacer posible el funcionamiento autónomo, para 2022 las organizaciones aumentarán sus inversiones en gobernabilidad de datos, funciones de ingeniería digital y tecnologías de operaciones digitales en un 40%”*. Según los datos de la misma investigación, para el año 2022, el 70% del total de las organizaciones acelerarán el uso de tecnologías digitales (Rockwell Automation, 2021).

Finalmente, en un estudio realizado por PwC⁵², un 86% de los directivos espera aumentar beneficios y reducir costos gracias a la inversión en Industria 4.0. Estas tecnologías afectan principalmente a la organización logística y a la realidad de la cadena de suministro. En este sentido, se establece que la inversión en I+D+i⁵³ en los procesos logísticos se ha convertido en un elemento esencial para el crecimiento económico a largo plazo de una multitud de empresas, siendo al mismo tiempo clave para la supervivencia de estas (Mecalux, 2021).

48 Nokia Corporation es una empresa multinacional de telecomunicaciones y tecnología con sede en el distrito de Keilaniemi, en Espoo, Finlandia. Está formada por dos grupos de negocios: Nokia Networks y Nokia Technologies.

49 ABI Research es una firma global de inteligencia tecnológica que ofrece investigación práctica y orientación estratégica a líderes tecnológicos, innovadores y tomadores de decisiones en todo el mundo.

50 Contados desde el año 2020, año de la investigación.

51 International Data Corporation (IDC) es el principal proveedor mundial de inteligencia de mercado, servicios de asesoramiento y eventos para los mercados de tecnología de la información, telecomunicaciones y tecnología de consumo.

52 PwC es una red de firmas presente en 155 países con más de 284.000 personas comprometidas en brindar calidad en los servicios de auditoría, impuestos y consultoría de negocios.

53 Son las siglas de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i).

2.3. Gestión de activos

2.3.1. Qué es la gestión de activos

Según la organización Valuekeep, la gestión de activos tiene como objetivo principal el coordinar el ciclo de vida de los activos⁵⁴. Corresponde al conjunto de actividades destinadas a extraer valor de los activos de la empresa, que evalúa las oportunidades, los riesgos y el rendimiento deseado de cada uno de ellos, a fin de establecer prioridades. El objetivo de la gestión de activos es maximizar la eficacia de estos a lo largo de su ciclo de vida, minimizar los fallos, reducir las pérdidas y maximizar las ganancias (Valuekeep, 2022).

Cabe mencionar que, a nivel internacional, la gestión de activos se encuentra regulada por la Organización Internacional de Normalización (ISO)⁵⁵, en particular a través de la familia de normas ISO 55.000:2014. Según el sitio web oficial de la organización, los beneficios de las normas corresponden a que *“La adopción de las normas ISO 55.001, ISO 55.002 y de esta norma internacional permite a la organización alcanzar sus objetivos a través de la gestión eficaz y eficiente de sus activos. La aplicación de un sistema de gestión de activos proporciona el aseguramiento de que dichos objetivos se pueden alcanzar de manera consistente y sostenible con el paso del tiempo.”* (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2014).

2.3.2. Gestión del mantenimiento

Según la empresa SafetyCulture⁵⁶, la gestión del mantenimiento es el proceso de seguimiento de los activos de una empresa y la supervisión de las actividades de mantenimiento (Hawes, 2022).

Se establece que la organización de las actividades de mantenimiento garantizará la optimización del rendimiento de cada activo. Además, se estima que el mantenimiento no se limita a la reparación de activos como equipos y maquinarias, sino que también incluye otros procedimientos como la inspección y la limpieza para mantener estos activos en condiciones de funcionamiento.

54 El ciclo de vida de un activo, según la norma ISO 55.000:2014, se define como las etapas implicadas en la gestión de un activo.

55 La Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization) (ISO) es una organización para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de normalización. Fundada el 23 de febrero de 1947, la organización promueve el uso de estándares privativos, industriales y comerciales a nivel mundial.

56 SafetyCulture es una empresa australiana fundada en el año 2004 creadora del software iAuditor una plataforma de acciones correctivas y captura de contratiempos de inspección para equipos.

2.3.3. Diferencia entre gestión de activos y gestión del mantenimiento

Según la organización Valuekeep, resulta relevante establecer la diferencia entre la gestión de activos y la gestión de mantenimiento. Si bien se complementan entre sí, son conceptos distintos (Valuekeep, 2022).

La gestión de activos se refiere a un sistema de gestión entre todos los departamentos que participan en los procesos empresariales, siendo el mantenimiento uno de esos departamentos.

El mantenimiento surge de la necesidad de mantener un equipo en funcionamiento, con planes de mantenimiento actualizados, con costos controlados y dentro de las expectativas de la organización. Sin embargo, si se pretende lograr la excelencia en el mantenimiento, es esencial entrar en el ámbito de la gestión de activos.

Si el objetivo es optimizar la disponibilidad de los activos durante su ciclo de vida, reducir los costos de reparación, aumentar la productividad y cumplir con la normativa, es necesario seguir los principios de la gestión de activos.

La gestión de activos incorpora el mantenimiento, ayudando al proceso de definición de las mejores estrategias que se deban aplicar a cada activo para lograr el objetivo final. Cuanto mejor sea la gestión de los activos, menores serán los costos asociados a su mantenimiento.

2.4. Mantenimiento industrial

2.4.1. Qué es el mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial es una herramienta fundamental para el correcto funcionamiento de cualquier empresa de ámbito industrial, esto debido a que repercute directamente en sus procesos productivos. Se trata de un aspecto muy relevante en el desarrollo de cualquier proceso de producción sea cual sea el sector de actividad al que se dedique la empresa, según la empresa española Seguas⁵⁷.

El mantenimiento industrial se puede definir como el conjunto de actividades necesarias para lograr un óptimo funcionamiento tanto de instalaciones, maquinarias y equipos como de los distintos espacios de trabajo que componen esas instalaciones industriales. También incluiría los trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento correcto y el buen estado de conservación del sistema productivo (Seguas, 2022).

⁵⁷ Seguas aire comprimido y frío industrial, es una empresa española dedicada a proyectar, realizar y mantener sistemas e instalaciones de aire comprimido, refrigeración y climatización industriales.

El objetivo final que persigue el mantenimiento industrial es garantizar la producción en cualquier proceso industrial, su calidad y mantener un correcto funcionamiento de los equipos alargando su vida útil⁵⁸. Se considera que el mantenimiento industrial es una inversión, que puede generar grandes beneficios entre los que se pueden mencionar:

- Prevenir y evitar accidentes laborales aumentando de esa manera la seguridad para las personas que intervienen en el proceso productivo.
- Disminuir y/o evitar las pérdidas causadas por detenciones de la producción.
- Permite contar con documentación y seguimiento de los mantenimientos necesarios para cada equipo.
- Impedir que surjan daños irreparables en las instalaciones industriales.
- Aumentar la vida útil de los equipos.
- Reducir los costos de operación de los activos.
- Conservar los bienes de equipo⁵⁹ en buenas condiciones.
- Mejorar la calidad de la actividad industrial.

2.4.2. Políticas de mantenimiento

Debido fundamentalmente a la alta relevancia que tiene en términos económicos el mantenimiento industrial, resulta imperativo establecer criterios y/o principios expresados en algún modelo que los dirija.

Por otra parte, los métodos de análisis de mantenimiento como, por ejemplo, el FMECA⁶⁰, sirven para establecer las políticas de mantenimiento que se aplicarán a los distintos activos, definiendo las condiciones y/o momentos en que se realizarán las actividades de mantenimiento.

Si bien en la revisión de la literatura respecto a este tema existen variadas versiones, categorías y/o clasificaciones, se puede establecer que tradicionalmente se coincide al menos en tres políticas fundamentales de mantenimiento industrial: correctivo, preventivo, y predictivo.

58 La vida útil es el periodo de tiempo que se espera utilizar un activo de una empresa, bajo una actividad económica eficiente.

59 Los bienes de equipo se pueden definir como los bienes destinados a producir otros bienes, de consumo o de inversión, para un consumo humano indirecto. Se van consumiendo en el proceso de fabricación, como, por ejemplo, una máquina.

60 Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) es un Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) que incluye evaluación de criticidad y análisis de causa raíz del modo de falla. El FMECA hace un análisis que cumple con los requisitos de un Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE), pero además identifica la causa raíz del modo de falla, su criticidad (riesgo) y una tarea para reducir o eliminar el riesgo, todo bajo un ambiente de priorización basada en riesgo.

Según la empresa española Seguas, las definiciones de estos tipos de mantenimiento son las siguientes (Seguas, 2022):

- ***Mantenimiento correctivo***

El mantenimiento correctivo en instalaciones industriales es aquel cuyo fin es corregir cualquier defecto que se presente en el equipo o instalación. Corrige acciones solo cuando se ha detectado la avería.

- ***Mantenimiento preventivo***

El mantenimiento preventivo de instalaciones industriales se puede caracterizar como aquel enfocado en la prevención de fallos en equipos e instalaciones con el objetivo de reducir riesgos. Intenta reducir errores o averías con una revisión constante y planificada según las necesidades de cada industria.

- ***Mantenimiento predictivo***

El mantenimiento predictivo es un tipo de mantenimiento más técnico y avanzado. Requiere de formación específica, conocimientos analíticos y necesita de equipos especializados. Al igual que el mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo busca anteponerse a las averías. La diferencia es que se basa en la aplicación de herramientas o técnicas de detección de distintas variables que son indicio del estado de un equipo y que anticipan un futuro fallo, como pueden ser, por ejemplo, la vibración, la presión o la temperatura.

2.4.3. Mantenimiento industrial 4.0

El mantenimiento industrial 4.0, según la empresa nacional DataScope, incluye una visión holística⁶¹ de las fuentes de datos, formas de conectarse, recopilar, analizar y acciones recomendadas a tomar para garantizar que la función de los activos (confiabilidad⁶²) y el valor (gestión de activos) sean asistidos digitalmente (Melo, 2020).

61 Una visión holística se define como aquella que contempla primero la totalidad del sistema o del problema, antes que sus partes integrantes. Esta visión puede arrojar una comprensión más cabal del conjunto, evitando con ello que se pierda de vista al concentrarnos en sus elementos.

62 La confiabilidad hace referencia a la capacidad de un componente, equipo o sistema, de no descomponerse o fallar durante el tiempo previsto para su funcionamiento bajo condiciones de trabajo perfectamente definidas.

Marco teórico

Uno de los principales desafíos de la Industria 4.0 es establecer maneras de interconectar los procesos existentes. Lo anterior consiste en utilizar la tecnología como elemento conector de máquinas, operaciones, equipamientos y personas.

A través de las tecnologías relacionadas a la Industria 4.0, el concepto de mantenimiento industrial puede resultar más simple, siendo, al mismo tiempo, fácil de controlar y acompañar en las operaciones.

Según la empresa Valuekeep, sin innovación, los departamentos de mantenimiento pierden fuerza y capacidad de respuesta. Con la utilización de sensores, AIoT, macrodatos, inteligencia artificial (AI) y otros sistemas inteligentes, es posible identificar de manera rápida el lugar en donde se están produciendo las fallas, además de poder descubrir cuáles son los equipamientos afectados, así como también las implicaciones de esos problemas en la productividad de las empresas (Valuekeep, 2022).

Por lo general, cuando resulta necesario recopilar datos sobre el estado de las máquinas, se recurre a técnicos especializados en esa área. El mantenimiento industrial 4.0, con el desarrollo de nuevas tecnologías conectadas, propone la utilización de máquinas que realizan esas tareas, de modo de maximizar la vida útil de los componentes de las máquinas y evitar fallos.

Con la utilización de tecnología de mantenimiento industrial 4.0, los datos buscan al ser humano y no al revés. Es así como los procesos de mantenimiento han evolucionado del modelo preventivo hacia el predictivo, lo que permite que el enfoque deje de estar centrado solamente en la prevención, sino más bien en la previsión.

Acompañar a la inversión y rentabilidad de los equipamientos, superar fronteras de comunicación o impulsar a las organizaciones en los diversos mercados son algunas de las ventajas de esta nueva era digital. Los macrodatos, por ejemplo, son un importante aliado del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)⁶³ de los equipamientos. La tecnología de los macrodatos, junto con la inteligencia artificial (AI), consigue determinar con mayor precisión la vida útil de los equipamientos, el riesgo de fallo y el respectivo impacto en los sistemas.

63 Son las siglas de Reliability Centered Maintenance (RCM).

2.5. Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM)

2.5.1. Conceptos generales

Según la presentación denominada *“Introduction to PHM: origins and research vision”*⁶⁴ realizada el año 2021 por Marcos Orchard, Académico del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile (Orchard, 2021), se describe que, en términos históricos, la primera generación de manejo de activos se caracterizó por las mantenciones correctivas, es decir, las que se llevan a cabo posterior a las fallas, pasando, posteriormente, a mantenimientos preventivos y regulares según calendario, es decir, aquellos mantenimientos que son planificados, llegando, finalmente, a una tercera generación, en donde nace el mantenimiento predictivo.

Este último consta de tres enfoques: Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), Mantenimiento Basado en la Condición (CBM)⁶⁵, y Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM).

- ***Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)***

Según la revista digital Predictiva21⁶⁶, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) es usado para determinar qué debe ser hecho para asegurar que cualquier activo físico o sistema continúe entregando el servicio que sus usuarios desean que preste.

Este proceso encuentra sus raíces en la industria de la aviación comercial internacional. Impulsada por la necesidad de optimizar la confiabilidad, esta industria desarrolló un proceso detallado para decidir qué mantenimiento era necesario ejecutar para mantener una aeronave volando. Este proceso evolucionó permanentemente desde sus inicios en 1960 (Predictiva21, 2021).

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se basa principalmente en conceptos estadísticos como, por ejemplo, la curva de la bañera⁶⁷, la cual caracteriza la tasa de falla a lo largo del ciclo de vida de los activos.

64 Esta presentación corresponde a la clase magistral realizada por Marcos Orchard en el evento científico y de investigación “Training week” programado por la Universidad de Granada, España, entre los días 19 al 23 de abril del año 2021.

65 Son las siglas de Condition Based Maintenance (CBM).

66 Predictiva21 es una revista digital de mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos.

67 La curva de la bañera es una gráfica que representa los fallos durante el periodo de vida útil de un sistema o máquina. Se llama así porque tiene la forma de una bañera cortada a lo largo.

- ***Mantenimiento Basado en la Condición (CBM)***

Según la empresa Cofrico⁶⁸, el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) es un tipo de gestión que plantea soluciones de reparación o reemplazo sobre la condición actual o futura de la maquinaria (Cofrico, 2020).

El Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) está asociado al monitoreo de daños, actualizando modelos según datos de revisión. Además, se realizan inspecciones basadas en el riesgo de falla.

Por otra parte, permite lograr un ahorro mayor frente a las técnicas de mantenimiento preventivo, ya que permite optimizar los tiempos y calcular cuándo es realmente necesario detener la maquinaria.

- ***Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM)***

Según la presentación, antes mencionada, denominada *“Introduction to PHM: origins and research vision”* realizada el año 2021 por Marcos Orchard, Académico del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile (Orchard, 2021), se describe la metodología de Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM) a través de diversos puntos, los que se mencionan a continuación.

Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM) corresponde al monitoreo de la condición de sistemas en tiempo real, tomando en cuenta tanto la información del estado actual (diagnosis) como del estado futuro (prognosis), con la finalidad de mejorar la toma de decisiones respecto a temas de mantenimiento. Los conocimientos asociados a PHM incluyen el aprendizaje automático, estadísticas, ingeniería de confiabilidad⁶⁹, entre otros.

En la fase de diagnosis se detectan (existencia), ubican (dónde) e identifican (criticidad) anomalías, permitiendo establecer con claridad el estado de salud de los sistemas.

68 Cofrico es una empresa española pionera y experta en la ejecución y mantenimiento de instalaciones de refrigeración con CO₂. Esta empresa apuesta por la eficiencia energética y el mantenimiento predictivo en frío industrial y comercial.

69 La ingeniería de confiabilidad se define como el conjunto de métodos, técnicas y herramientas que sirven para determinar el grado de seguridad en el que un dispositivo, producto o sistema trabajará en condiciones óptimas durante un determinado periodo de tiempo.

En la fase de pronosis se estudian los eventos futuros denominados tiempo hasta la falla (ToF)⁷⁰ y vida útil remanente (RUL). El primero responde a la pregunta ¿cuándo ocurrirá el sistema en una condición de falla?, el segundo responde a la pregunta ¿cuánto tiempo queda hasta la falla?, si bien ambos conceptos son similares, se pueden comprender de distinta manera, el primero estima una potencial fecha en que ocurrirá la falla, independiente del momento en que se esté haciendo el análisis, mientras que el segundo toma en consideración, y como punto de referencia, precisamente el momento en que se esté haciendo el análisis. Sin embargo, cabe mencionar que, en la revisión de la literatura relacionada con PHM, es habitual el uso indistintamente de ambos conceptos, un ejemplo de aquello lo constituye el paper⁷¹ *“Methods to improve the prognostics of time to failure models”* del año 2021 (Baumann et al., 2021).

2.5.2. Caracterización de la metodología PHM

Según el paper *“Prognostic health management of production systems. New proposed approach and experimental evidences”* del año 2019 (Calabrese et al., 2019), Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM) es una política de mantenimiento destinada a predecir la ocurrencia de una falla en los componentes y, en consecuencia, minimizar los tiempos de inactividad inesperados de sistemas complejos.

Los desarrollos recientes en las técnicas de monitoreo de condición⁷² y las herramientas de inteligencia artificial (AI) han hecho posible la recopilación de una gran cantidad de datos en tiempo real y su transformación en información significativa que respalde el proceso de toma de decisiones de mantenimiento.

70 Son las siglas de time of failure (ToF), también puede ser encontrado como time to failure (TTF).

71 Un artículo científico, a veces también llamado paper como anglicismo, es un trabajo de investigación o comunicación científica publicado en alguna revista especializada. También se le llama documento científico, o simplemente artículo o publicación.

72 El monitoreo de condición (condition monitoring) (CM) es el proceso de medir de forma periódica uno o más parámetros en la maquinaria, con el fin de identificar cambios significativos que usualmente indican fallas en proceso o variaciones en el monitoreo de vibración.

Por otra parte, las tecnologías emergentes de sistemas ciberfísicos, conectan sistemas físicos distribuidos con sus representaciones virtuales en el mundo computacional cibernético⁷³. En este sentido, la metodología PHM asume un papel clave en la implementación de sistemas ciberfísicos y sus máquinas en condiciones adecuadas. Además de lo anterior, Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM) basado en sistemas ciberfísicos brinda una solución eficiente para maximizar la disponibilidad de las máquinas y los sistemas de producción.

El enfoque de la metodología PHM generalmente requiere realizar varias pruebas que simulen las condiciones de falla conocidas, esto con la finalidad de recopilar los conjuntos de entrenamiento para el aprendizaje de los modelos.

Se considera que la integración de los sistemas ciberfísicos, IoT y PHM proporciona una visión sistemática del pronóstico del estado de la máquina, la programación del mantenimiento a nivel de máquina y la optimización del mantenimiento a nivel de sistema.

Además, la integración de los sistemas ciberfísicos, IoT, la computación de borde y la computación en la nube permite realizar la detección de fallas en tiempo real, con algoritmos que son capaces de autoadaptarse al entorno dinámico de los contextos industriales, mientras acumula conjuntos de entrenamiento durante el funcionamiento de la máquina, analizándolos a través de algoritmos de aprendizaje automático precisos realizados en la nube.

Tradicionalmente, los algoritmos de aprendizaje se pueden adoptar con fines de clasificación o regresión. En los problemas de clasificación, las observaciones etiquetadas se utilizan para construir modelos (paso de entrenamiento) que pueden predecir la variable discreta objetivo, es decir, la clase de falla, para futuras observaciones, cuyos únicos atributos exploratorios son conocidos. La regresión se utiliza para predecir el valor de la variable objetivo cuando puede asumir valores continuos. Por lo tanto, mientras que la clasificación se adopta durante el paso de diagnóstico, dando como resultado la clase de falla a la que pertenece cada nueva observación, el proceso de regresión se utiliza para predecir los valores que asumirán los atributos en el futuro, para estimar cuándo se alcanzará el tiempo de falla (failure time) y, por lo tanto, la vida útil remanente (RUL) del componente monitoreado.

⁷³ El concepto moderno de cibernético se caracteriza por ser todo lo que se relaciona con la tecnología computacional, especialmente con internet.

Debido al gran volumen de datos que pueden ser recopilados desde la máquina monitoreada, se pueden adoptar variados algoritmos de inteligencia artificial (AI) y aprendizaje automático para la extracción de características, diagnósticos y pronósticos. Todos estos algoritmos se pueden clasificar en función de tres criterios:

- La naturaleza de los datos disponibles.
- La tarea por realizar.
- El tiempo en que se necesitan los resultados.

2.5.3. Casos de estudio

2.5.3.1. Contribución y requerimientos del PHM en el diseño de políticas de mantenimiento en un horno de arco eléctrico

Este caso de estudio fue analizado en el paper *“On the role of prognostics and health management in advanced maintenance systems”* del año 2016 (Guillén et al., 2016). El caso sirve para ilustrar, de manera concreta, algunas consideraciones sobre el papel del PHM en la configuración de la nueva visión del mantenimiento en el contexto e-maintenance⁷⁴ e Industria 4.0.

Se trata de un desarrollo que complementa a un estudio realizado en el año 2015 donde se aborda la implementación de una herramienta e-maintenance en un contexto industrial.

En este caso, se pretende obtener un mayor aprovechamiento de los sistemas SCADA⁷⁵ de un horno de arco eléctrico (EAF)⁷⁶.

Los sistemas SCADA corresponden a sistemas pensados para la operación y control, su uso en mantenimiento suele centrarse en el reporte de eventos como las paradas y en la programación de un número limitado de alarmas sobre fallos producidos o inminentes o un riesgo muy alto de deterioro en los equipos.

Este caso analiza un proyecto de implementación realizado en un entorno industrial real de una empresa siderúrgica italiana.

74 El e-maintenance es un concepto de mantenimiento emergente, que posibilita la gestión del mantenimiento de activos de producción utilizando internet.

75 SCADA, acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition, es un concepto que se emplea para realizar un software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita la retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo, y controla el proceso automáticamente.

76 Un horno de arco eléctrico (electric arc furnace) (EAF) es un horno que se calienta por medio de un arco eléctrico. Los tamaños de un horno de arco eléctrico van desde la tonelada hasta las 400 toneladas de capacidad. El horno de arco eléctrico es utilizado en la industria metalúrgica.

Marco teórico

Puntualmente, el caso proporciona una explicación de la metodología adoptada para implementar la herramienta e-maintenance, cuyo objetivo final es controlar la degradación de un horno de arco eléctrico (EAF).

Cabe destacar que la seguridad es un objetivo relevante de las operaciones de un horno de arco eléctrico (EAF). Además, debido a que estos hornos funcionan continuamente a altas temperaturas y en condiciones ambientales adversas, la inspección de muchos componentes puede ocurrir solamente cuando los hornos son detenidos para un mantenimiento preventivo (programado).

Por lo tanto, las capacidades de monitoreo en tiempo real son esenciales para mantener bajo control el estado de salud de estos hornos y sus componentes, en este caso el sistema de combustión. Dada esa finalidad, la herramienta e-maintenance amplía la funcionalidad de un SCADA existente con detección y diagnóstico de estado.

La detección de estado compara los datos recopilados que representan el funcionamiento real del sistema de combustión con los parámetros de referencia (valores de referencia) de caudales y presiones integrados en un modelo estadístico, es decir, un modelo de regresión basado en datos de campo disponibles en SCADA. Cuando se detecta una desviación de los valores de referencia, se informa la ocurrencia de eventos anormales.

Posteriormente, el diagnóstico se enfoca en los modos de falla y sus causas. La identificación de las causas utiliza un esquema de solución de problemas y, con posterioridad, se activa una tarea de generación de avisos para proporcionar al operador una lista de verificación⁷⁷ de las operaciones a realizar para solucionar las causas.

La siguiente tabla muestra las contribuciones (capacidades provistas) y los requerimientos (recursos requeridos) del PHM en el diseño de políticas de mantenimiento en el caso de estudio.

⁷⁷ Una lista de verificación es una lista de contramedidas definidas como resultado de un análisis de riesgos y operabilidad del sistema de combustión.

Componente de la Política de Mantenimiento	PHM: posibles contribuciones y/o requerimientos
Nivel de Intervención (Indenture level)	PHM introduce una mayor capacidad de para proveer información precisa sobre el funcionamiento del sistema de encendido, que es uno de los equipos críticos para la operación segura y eficiente del EAF.
Nivel de Mantenimiento (Maintenance level)	PHM permite extender la funcionalidad del actual SCADA integrando en el mismo la capacidad de la detección y diagnosis de fallo en el Sistema de encendido antes de que este ocurra. PHM permite aumentar el control del riesgo de fallo y la degradación del Sistema de encendido. PHM permite cambiar el mantenimiento a tareas de CBM, reduciendo las tareas de mantenimiento programado en el sistema de encendido.
Escalón o Línea de Mantenimiento (Echelon or line of maintenance)	PHM requiere el desarrollo y/o incorporación de algunas, aunque limitadas, habilidades para el desarrollo, test y set-up y mantenimiento de la herramienta E-maintenance PHM requiere nuevos recursos tecnológicos, como software, cuyo propósito es extender la funcionalidad del SCADA del EAF. También sería necesario hardware adicional si las señales requeridas no estuvieran ya disponibles en el control de proceso. PHM es integrado dentro de la herramienta E-maintenance, proporcionando así una monitorización tiempo-real que se extiende al mantenimiento.

Tabla 1: PHM: posibles contribuciones y/o requerimientos. Fuente: tandfonline.com.

Posterior a la implementación descrita en este caso, la empresa utilizó la herramienta como parte de la automatización encargada de ejecutar el control de las operaciones del horno de arco eléctrico (EAF). Lo anterior dio lugar a un mayor control y capacidad de actuación sobre el sistema de quemado, con los consiguientes beneficios para la seguridad de los procesos.

2.5.3.2. Rotores de turbinas de vapor

Este caso de estudio es parte del capítulo 9 del libro *“Engineering design under uncertainty and health prognostics”* del año 2019 (Hu et al., 2019). El trabajo descrito corresponde a la utilización de la metodología PHM en varios sistemas de turbinas de vapor⁷⁸ de cuatro plantas de energía en Corea (Hu et al., 2019).

Aunque las turbinas generalmente están diseñadas para operar en condiciones estables, existen varias incertidumbres como, por ejemplo, la de operación, la variabilidad de fabricación y su instalación. En condiciones adversas, se pueden encontrar diversos estados de anomalía en un sistema de turbina, por ejemplo, desequilibrio, desalineación, roce, remolinos de aceite, entre otros.

⁷⁸ Las turbinas de vapor son máquinas que convierten un flujo de vapor en energía mecánica que, normalmente, se transmite a un generador para producir electricidad.

- ***Diseño de la función de detección de salud***

Al momento de aplicar la metodología PHM, es usual la utilización de las señales de vibración para generar los diagnósticos de salud y pronósticos. En el caso particular de las turbinas de vapor, se considera que, incluso en condiciones normales, un poco de desequilibrio está presente en los rotores de las turbinas⁷⁹, lo que se traduce en un cierto nivel de vibración al girar, sin embargo, las anomalías comienzan a desarrollarse cuando el nivel de vibración aumenta.

Además de los sensores de vibración, las señales de temperatura y presión también son variables importantes dentro de la aplicación de la metodología PHM. Debido a lo anterior, la adquisición de datos debe diseñarse cuidadosamente y se debe poner atención para tener en cuenta las frecuencias y las tasas de muestreo de datos, el registro de energía y almacenamiento, entre otros factores.

- ***Diseño de la función de razonamiento de salud***

El objetivo de la función de razonamiento es extraer los datos de salud de los activos monitoreados, en este caso de las turbinas de vapor, utilizando las señales de vibración medidas. Lo anterior requiere de algunos pasos claves de razonamiento, estos incluyen el preprocesamiento, extracción, selección y clasificación de características. Estos son los pasos necesarios para el método de aprendizaje automático supervisado⁸⁰.

Las señales de vibración se preprocesan para considerar la ocurrencia de variaciones mayores debido a las incertidumbres, las que pueden dar lugar a resultados de razonamiento incoherentes debido a que es probable que se produzcan datos muestreados diferentes en intervalos de tiempo determinados.

Luego, se procede a la extracción de características, esta es una parte fundamental en la aplicación de la metodología PHM, ya que la precisión de los modelos de diagnóstico depende en gran medida de estas. En particular, se realiza cuando los componentes o sistemas cuentan con muchos sensores, para extraer información relevante y no redundante del conjunto de datos sin procesar.

79 En una turbina se pueden distinguir dos partes, el rotor y el estátor. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estátor también está formado por álabes, no unidos al eje, sino a la carcasa de la turbina.

80 Según la situación, los algoritmos de aprendizaje automático funcionan con más o menos intervención o refuerzo humano. En el denominado aprendizaje automático supervisado, los computadores tienen un grupo etiquetado de datos que les permiten aprender a hacer una tarea humana. Este es el modelo menos complejo, ya que intenta replicar el aprendizaje humano.

El proceso de selección de características determina el subconjunto óptimo de estas. Cada característica posee una capacidad de separación diferente para distinguir los estados de salud de la turbina de vapor. Se pueden usar algoritmos para generar aleatoriamente subconjuntos de características, y los grados de separabilidad se pueden medir para los subconjuntos usando métodos probabilísticos. La generación de subconjuntos se repite hasta que se satisface un criterio predefinido.

Una vez que se determina el subconjunto de características óptimo, se clasifican utilizando métodos que funcionan a través de un proceso de optimización, los que separan varios estados que se entrenan utilizando datos de estados conocidos. Finalmente, usando el clasificador entrenado, se pueden predecir los estados desconocidos de la turbina.

- ***Diseño de las funciones de pronósticos y gestión de la salud***

La función de pronóstico predice la vida útil remanente (RUL) de las maquinarias monitoreadas, en este caso de las turbinas de vapor. Para desarrollar la función de pronóstico, se define un indicador de salud (HI)⁸¹ para cada estado de anomalía.

Cabe señalar que, dentro de la aplicación de la metodología PHM, una etapa relevante se refiere a la estimación de la condición del sistema, expresada a través de un indicador de salud (HI). El valor de este indicador refleja el estado de salud (HS) de un sistema específico, el que posiblemente puede verse afectado por la degradación, fallas o condiciones externas ocurridas durante el tiempo de utilización de ese sistema.

Cada indicador de salud (HI), definido en función de las características extraídas, considera ciertas características de las condiciones de anomalía. En el caso de la turbina, un ejemplo puede ser un estado de desequilibrio.

Health state	Anomaly index
Unbalance	$\frac{V_{pp}}{clearance}$
Rubbing	$\frac{V_{pp}}{clearance} (2 - Aspect\ Ratio\ of\ 1X\ Orbit)$
Oil whirl	$\frac{V_{pp}}{clearance} (2 - f8)$
Misalignment	$\frac{V_{pp}}{clearance} (2 - Aspect\ Ratio\ of\ 1X\ Orbit)$

Tabla 2: Definición de índices de anomalías para cada estado de salud (HS). Fuente: link.springer.com.

⁸¹ Son las siglas de health indicator (HI).

Después de definir los indicadores de salud (HI), se puede calcular la vida útil remanente (RUL) rastreando la tendencia de los indicadores, como se puede observar en el siguiente gráfico, los puntos azules se utilizan para establecer el modelo RUL, el que se usa para estimar el RUL de la turbina de vapor, como lo muestra la línea de puntos verdes.

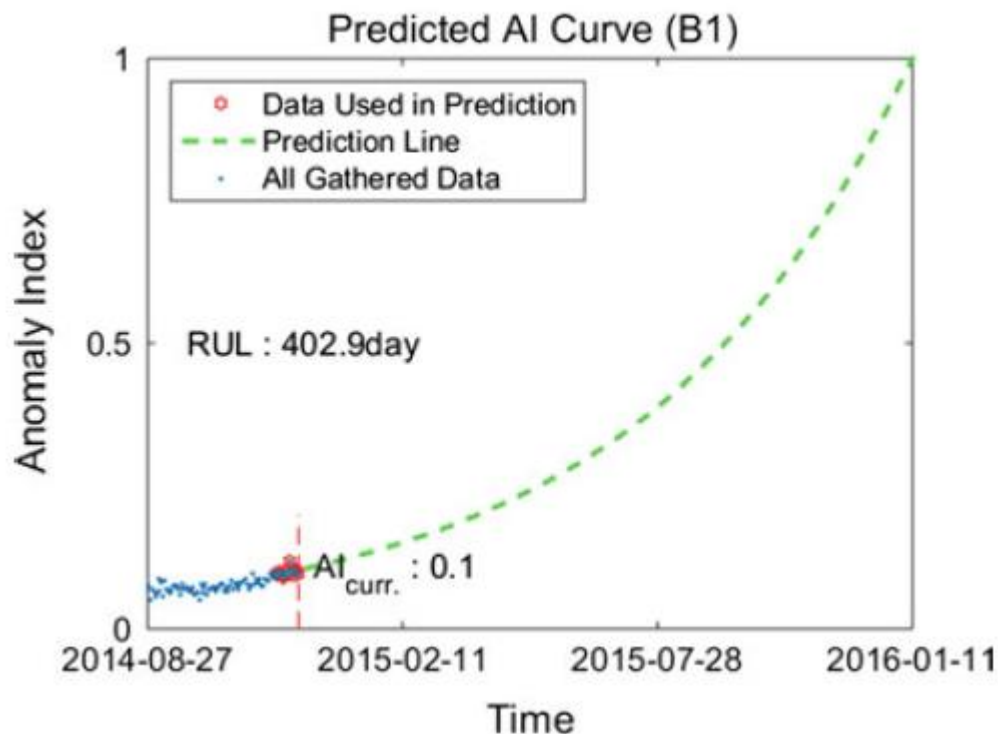


Gráfico 1: Estimación de la vida útil remanente (RUL) de una turbina de vapor. Fuente: link.springer.com.

Un RUL calculado con precisión proporciona la base para que los operadores de turbinas de vapor puedan programar acciones de mantenimiento a partir de la condición analizada de las turbinas. Los operadores pueden minimizar las acciones de mantenimiento innecesarias y pueden prevenir fallas catastróficas en las turbinas al predecir de manera confiable las condiciones de salud de estas, lo que puede traducirse en un ahorro sustancial en la operación general y costos de mantenimiento.

3. Planteamiento metodológico de investigación

3.1. Consideraciones generales

Para establecer el planteamiento metodológico de investigación, se comienza por determinar el tipo de investigación a realizar, lo que se decide tomando en consideración las características propias de la investigación, los alcances, objetivos y temáticas a tratar. Posteriormente, se propone una metodología para abordar el desarrollo de la investigación, el que consta de una secuencia lógica de pasos a seguir los que, a su vez, están claramente definidos, determinando el propósito de estos y su contribución al logro de los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación.

3.2. Tipo de investigación

Según el capítulo 7 del libro *“Metodología de la investigación”* del año 2010 (Bernal, 2010), en la ciencia existen diferentes tipos de investigación y es necesario conocer sus características para saber cuál de ellos se ajusta mejor a la investigación que va a realizarse (Bernal, 2010).

El autor propone diversas clasificaciones, estableciendo que la elección o selección del tipo de investigación dependerá, fundamentalmente, del objetivo del estudio del problema de investigación.

Es así como, dada la revisión de las definiciones para cada tipo de investigación, se determina apropiado, para el desarrollo de la investigación, aplicar el tipo de investigación denominado como descriptiva, dado que apunta a establecer las características, por ejemplo, distintivas de la metodología PHM frente a la oferta relacionada a mantenimiento industrial dentro del mercado nacional, con especial atención en el sector minero.

Además, se debe considerar que, dadas las características indagatorias del presente trabajo de investigación, las que son abordadas por la información obtenida del mercado estudiado, así como también por entrevistas a partes interesadas del rubro minero, fortalece la idea de aplicar el tipo de investigación descriptiva.

3.3. Propuesta metodológica

Para llevar a cabo la investigación, se consideran varios pasos secuenciales que contribuyen en el cumplimiento de los objetivos y alcances planteados.

Planteamiento metodológico de investigación

Se comienza con un análisis de la oferta de mantenimiento industrial dentro del mercado nacional, esto con el propósito de establecer sus principales características, así como sus conocimientos, principios y tecnologías utilizadas, para, de ese modo, tener una idea del grado de acercamiento, por parte de estas empresas oferentes, con las herramientas propias de la Industria 4.0 y el involucramiento de estas en las propuestas de valor presentadas a sus clientes o potenciales clientes. Además, se busca determinar los principales activos o maquinarias que, dadas las señales del mercado, pueden constituir, potencialmente, parte de la demanda de servicios tales como los que pueda ofrecer la metodología PHM, en especial aquellos que tengan relación con la industria minera.

En la siguiente fase, se analizan las características más relevantes de la metodología PHM encontradas en la revisión de la literatura asociada a esta, haciendo una breve descripción de los conceptos, fundamentos, principios y variables elementales investigadas, especialmente en la presentación de casos de aplicación. Lo anterior, tiene como idea principal sintetizar los aspectos centrales de esta metodología, para, de esa manera, tener presente esa información al momento de abordar los siguientes puntos. Además, se presenta la elaboración de modelos de propuestas de valor de la metodología PHM que, dadas las señales que muestra el mercado de mantenimiento industrial, puedan cubrir problemáticas presentes en el sector minero nacional.

Luego, se continúa con el desarrollo de la investigación realizando un paralelo entre lo indagado en el mercado de mantenimiento industrial versus la metodología PHM, haciendo énfasis en la oferta relacionada al rubro minero. La idea detrás de este punto es, fundamentalmente, analizar las diferencias, potencialidades o virtudes de esta metodología en relación con lo visto en la oferta mencionada y, de paso, establecer los primeros acercamientos para resolver cómo estas diferencias detectadas pueden contribuir en el aumento de la eficiencia de las actividades, operaciones o procesos de estas empresas, así como también en el logro de mejoras en su competitividad.

Además, se pretende inferir, al mismo tiempo, las alternativas que existen en el mercado, productos sustitutos o complementarios, como así también probables socios comerciales⁸² que sean necesarios para llevar a cabo la implementación de la metodología PHM en los planes de mantenimiento de las empresas partícipes del mercado minero nacional.

82 Un socio comercial, socio de negocios, partner o business partner es una entidad comercial con la que otras entidades comerciales tienen alguna forma de alianza.

Planteamiento metodológico de investigación

Posteriormente, se contempla la elaboración y realización de entrevistas a partes interesadas de la industria minera nacional, cuyo fundamental propósito es conocer sus problemáticas, temáticas o soluciones más valoradas, a fin de complementar lo indagado anteriormente en el mercado de mantenimiento industrial.

Finalmente, se debe mencionar que todo lo anterior busca proporcionar una idea clara respecto del potencial impacto de la implementación de la metodología PHM en las estrategias de mantenimiento de los diversos activos de las empresas del mercado minero nacional, en especial aquellos relacionados a actividades que puedan considerarse críticas dada su alta relevancia dentro de la cadena de valor⁸³ de estas organizaciones.

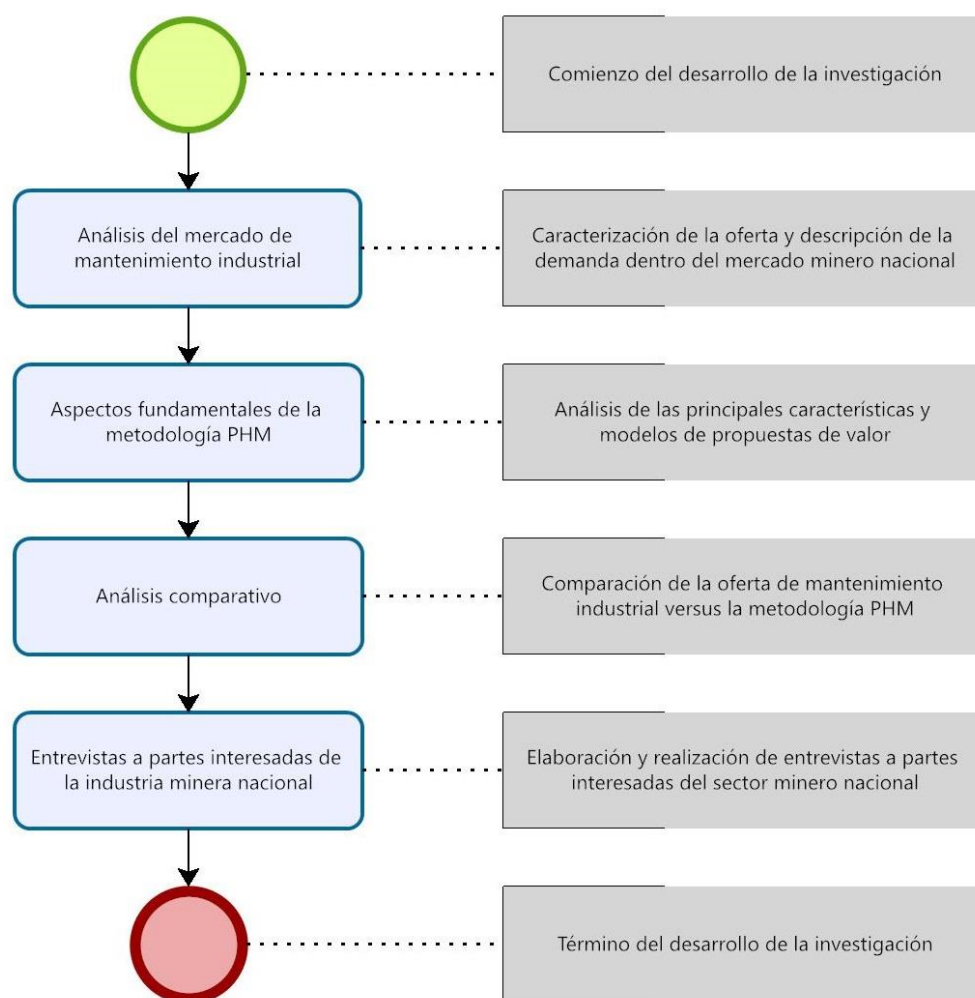


Figura 1: Esquema de la propuesta metodológica de investigación. Fuente: Elaboración propia.

83 La cadena de valor o cadena de valor empresarial es un modelo teórico que permite describir el desarrollo de las actividades de una organización empresarial generando valor al producto final.

4. Desarrollo de la investigación

4.1. Ideas generales

Con el propósito de llevar adelante el desarrollo de la investigación, tal como se estableció en el planteamiento metodológico de investigación, se deben seguir ciertos pasos que contribuyan a visualizar las oportunidades de aplicación de la metodología PHM, en especial dentro del mercado minero nacional.

Se comienza analizando la oferta relacionada a mantenimiento industrial, esto incluye la caracterización de empresas oferentes relevantes dentro del mercado nacional, así como además de sus bienes y/o servicios ofrecidos. Por otra parte, se describen algunos de los activos que pueden ser considerados como parte de la demanda habitual o que probablemente requieran prestaciones de mantenimiento predictivo, así como también su relación con actividades propias de la industria minera en las que potencialmente pudiese ser implementada la metodología PHM.

Lo anterior contribuye además para establecer, por ejemplo, los productos sustitutos o complementarios a la metodología PHM, como así también a identificar los posibles socios comerciales que sean necesarios para llevarla a cabo.

Luego, se analiza lo relacionado a la metodología PHM propiamente tal, esto basado en lo previamente investigado, estableciendo sus características principales, incorporando nuevos conceptos o consideraciones sobre esta metodología, observaciones relevantes, así como además de la elaboración de modelos de propuestas de valor que pueden ser fundamentadas a partir de las diversas investigaciones llevadas a cabo relativas al concepto de Pronósticos y Gestión de la Salud (PHM).

Posteriormente, se desarrolla un análisis comparativo entre lo investigado en el mercado de mantenimiento industrial versus la metodología PHM. Este punto pretende contribuir a la visualización de las potenciales ventajas de esta metodología respecto lo existente en el mercado, especialmente en aquellas soluciones relacionadas al sector minero.

Finalmente, se aborda todo lo relacionado a las entrevistas a partes interesadas de la industria minera nacional, detallando el tipo de entrevista, el cómo se elaboran, la realización de estas, así como además comentar lo indagado, la información obtenida y su grado de relación con lo investigado en el mercado de mantenimiento industrial.

4.2. Análisis del mercado de mantenimiento industrial

4.2.1. Caracterización de la oferta dentro del mercado nacional

4.2.1.1. Fracttal

Esta compañía se define como una empresa emergente⁸⁴ tecnológica, dinámica y en expansión. Su matriz se encuentra en España y posee sucursales en Chile, Colombia, Brasil, México y Estados Unidos. Su oferta se centra en una solución integral, basada en un software CMMS/GMAO⁸⁵ para la gestión de mantenimiento de activos, el que opera de manera online y en la nube. Uno de los principales mensajes de esta empresa es pretender ser una única solución para la gestión del mantenimiento de los activos, entregando a sus clientes la posibilidad de utilizar movilidad⁸⁶, internet de las cosas (IoT) y macrodatos, integrándose en cualquier sistema de gestión empresarial, con la finalidad de que las organizaciones puedan realizar sus operaciones de forma eficiente, segura y sostenible.

Fracttal cuenta con tres productos principales: Fracttal one, Predictto, y Fracttal X.

- ***Fracttal one***

Fracttal one es un software de mantenimiento CMMS/GMAO de gestión de activos, cuyo propósito es ayudar en la realización de las operaciones de mantenimiento a través de una plataforma a la que se puede acceder por medio de dispositivos móviles, otorgando información disponible desde una nube. Además, puede ser conectado a dispositivos de IoT⁸⁷ e integrado a sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP)⁸⁸. Sirve para programar las operaciones de mantenimiento, gestionar los activos disponibles, controlar tareas y operaciones programadas, análisis de las actividades en tiempo real y generar informes avanzados.

84 Las empresas emergentes, también llamadas startup, son un tipo de estructura empresarial orientada a conseguir un negocio escalable y replicable, son compañías que buscan emprender o montar un nuevo negocio, generalmente dentro del área de innovación, desarrollo de tecnologías, diseño o desarrollo web.

85 La gestión de mantenimiento asistido por computador u ordenador (GMAO), o también conocida como computerized maintenance management system (CMMS), es una herramienta de software que ayuda en la gestión de los servicios de mantenimiento de una empresa.

86 La movilidad hace referencia a poder tener acceso a la información en tiempo real a través de múltiples dispositivos móviles.

87 Los dispositivos de IoT son piezas de hardware con sensores que transmiten datos de un lugar a otro a través de internet. Los tipos de dispositivos de IoT incluyen sensores inalámbricos, software, actuadores y dispositivos informáticos.

88 Los sistemas de planificación de recursos empresariales (enterprise resource planning) (ERP) son sistemas de información que sirven para administrar las actividades de finanzas, cadena de suministro, operaciones, comercio, generación de informes, fabricación y recursos humanos de una empresa.

- ***Predictto***

Este producto promete predecir el futuro de los activos, dando a conocer el momento en el que estos pueden fallar. En base a este producto, las organizaciones pueden tomar decisiones sobre su planificación de mantenimiento utilizando para ello aprendizaje automático e internet de las cosas (IoT). Predictto funciona en base al denominado análisis Weibull⁸⁹, implementando este análisis dentro de sus sistemas con la finalidad de realizar tareas predictivas en los planes de sus clientes, siendo un elemento clave de este producto.

Predictto ofrece a sus clientes ser una herramienta que permita transformar un proceso complejo en algo simple, permitiendo generar análisis de confiabilidad en pocos pasos, utilizando, para ello, modelos a la medida del cliente, esto debido a que se estimula que sean ellos mismos quienes decidan qué información utilizar para crear los modelos predictivos, además de ser capaz de dar resultados auto-explicativos, es decir, visualizar la información en gráficas de forma fácil con la finalidad de que sus clientes puedan tomar las mejores decisiones en cuanto el uso de los activos.

Predictto cuenta con dos tipos de modelos:

- ***Modelo de degradación:*** Este tipo de modelo ayuda a predecir el comportamiento de los activos que se pueden monitorear.
- ***Modelo de confiabilidad:*** Con este modelo se pueden generar estadísticas sobre los activos de relevancia secundaria o sobre los que no se pueden monitorear.

Para quienes ya sean clientes, es posible integrar Predictto con todas las soluciones de Fractal, o bien, según esta empresa, implementarse en el plan de gestión de mantenimiento habitual que utilicen los nuevos clientes.

Dentro de los usos de Predictto se pueden encontrar:

- ***Crear modelos predictivos***

Predictto promete crear modelos de aprendizaje automático basados en los datos de los procesos.

⁸⁹ El análisis Weibull es un tratamiento especial de la distribución de la confiabilidad que incluye el perfil de riesgo como una función del tiempo. Utilizando papel gráfico especial (log/log-log) o software especializado, se trazan las fallas y se dibuja una línea de regresión de mínimos cuadrados.

Desarrollo de la investigación

- *Pronosticar la confiabilidad*

Este uso ofrece anticipar el valor de la confiabilidad de los activos y descubrir el momento en el cual se presentará la falla o incidencia.

- *Establecer una buena relación entre riesgo y costo*

Esto pretende poder calcular cuándo es el mejor momento para iniciar el ciclo de mantenimiento de un activo en particular, su periodicidad y costo estimado.

- *Digitalizar los procesos*

Generar informes digitales con gráficas interactivas que puedan ser impresas en el mismo momento.

Predictto promete ser una solución que integra el software CMMS/GMAO y análisis de datos. Con la información con la cual ya se cuente del mantenimiento de la empresa, se integra el software CMMS/GMAO con una plataforma en la nube capaz de crear modelos predictivos cuya finalidad sea facilitar la planeación y la toma de decisiones de mantenimiento.

Uno de los puntos centrales de Predictto, es ser una herramienta capaz de ir de la confiabilidad a la medición de riesgo. En este sentido, busca proporcionar información relevante para poder realizar los siguientes análisis y tomar las mejores decisiones en cuanto mantenimiento:

- Gestión basada en riesgo.
- Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).
- Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE).
- Fiabilidad.
- Planeación financiera.
- Gestión de operaciones.

El uso de Predictto puede ir de la mano con la sincronización de los datos desde Fractal u otras fuentes externas, poder visualizarlos de manera rápida, crear modelos predictivos según las consideraciones del cliente, para de esa forma obtener pronósticos que sean fáciles de comprender, esto a través de una interfaz que pretende ser sencilla y amigable.

Desarrollo de la investigación

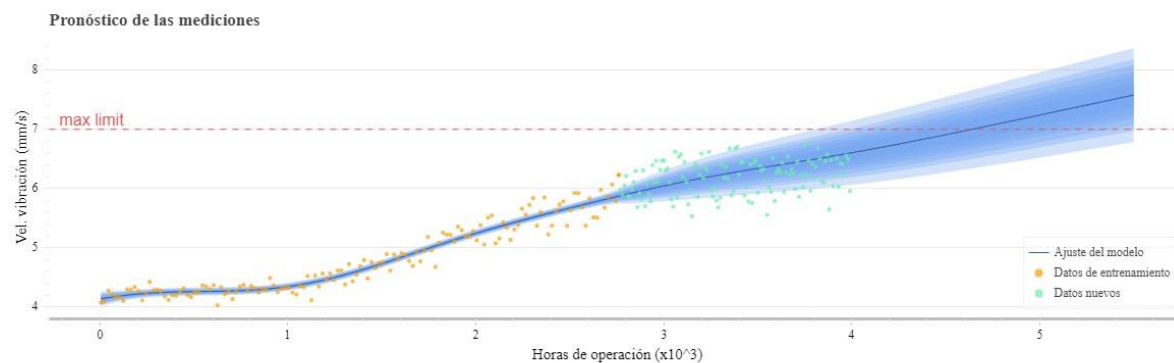


Gráfico 2: Modelo de degradación de un motor eléctrico. Fuente: predictto.com.

La información que proporciona Predictto puede ser usada bajo diferentes normativas internacionales que establecen límites para la velocidad de vibración de diferentes maquinarias, según su tipo y uso. Además, es posible que, de acuerdo con la experiencia del cliente, se determine que las vibraciones para sus equipos no deban pasar de ciertos límites de funcionamiento satisfactorio. Por esa razón, Predictto permite ingresar los límites que los clientes determinen como más convenientes para sus activos en particular.

Por otra parte, al establecer límites para la variable elegida por el cliente, se puede obtener información respecto a la confiabilidad del activo, como se observa en la siguiente gráfica, ya que a medida que la vibración se acerca más al límite de funcionamiento establecido, la confiabilidad del activo disminuye.

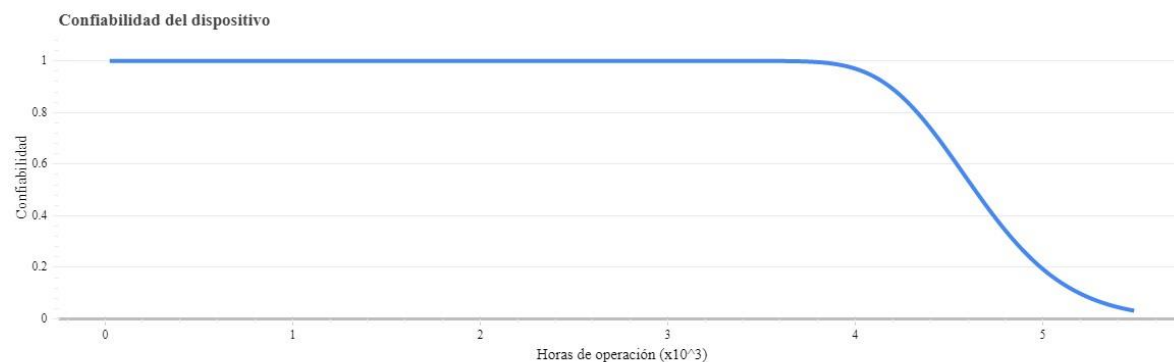


Gráfico 3: Confiabilidad de un motor eléctrico. Fuente: predictto.com.

Es así como Predictto promete a sus clientes poder conocer la vida útil de sus activos, permitiendo realizar una gestión de mantenimiento planificada e inteligente.

- **Fractal X**

Fractal X es un equipo con tecnología IoT y pantalla táctil, sirve para medir la calidad del entorno, el estado de los activos, notificar incidencias y crear solicitudes vinculándolas a los planes de gestión del mantenimiento.

Fracttal X es una solución IoT diseñada para el mantenimiento de los activos físicos, considerando cuatro puntos esenciales:

- Monitorear el entorno y las variables críticas que afectan a los procesos y activos.
- Fracttal X se puede conectar a la red WiFi⁹⁰, LAN⁹¹ o GSM⁹².
- Transmite la información directamente a la nube de Fracttal.
- Fracttal X ofrece ser un software de instalación rápida y fácil de configurar.

Fracttal X promete utilizar la tecnología IoT para la transformación digital, lo que ayuda, según la empresa Fracttal, a las empresas de diferentes tamaños a tener un mejor control en su gestión del mantenimiento de activos. Dada una instalación sencilla del producto, se comienza a monitorear condiciones y a organizar el mantenimiento preventivo.

Fracttal X promete ser una herramienta que permita a sus clientes mantener los equipos, instalaciones o cualquier otro tipo de bienes de las empresas en óptimas condiciones para aumentar los beneficios de estos con el tiempo.

4.2.1.2. SHEN reliability engineering (SHEN-RE)

Esta empresa se encuentra presente en la industria nacional desde el año 2007. Su casa matriz se encuentra en Santiago, cuenta además con sucursales en Concepción e Iquique.

Dedicada a la ingeniería de mantenimiento, su principal objetivo es asegurar una alta confiabilidad en el diseño y operación de planta. Esta empresa enfoca su trabajo en el área de activos físicos, proporcionando servicios que refuercen la confiabilidad de diseño, el mantenimiento preventivo y predictivo, así como además la gestión del conocimiento, sumado a una oferta de capacitación relacionada a cada uno de estos temas.

SHEN-RE pretende mantenerse a la vanguardia, teniendo como propósito innovar para poder cubrir los requerimientos de sus clientes, destacándose en el desarrollo de MODMA, un software integral de apoyo al mantenimiento.

90 El WiFi es un mecanismo que permite, de forma inalámbrica, el acceso a internet de distintos dispositivos al conectarse a una red determinada.

91 Una red de área local (local area network) (LAN) es una red que conecta uno o más ordenadores dentro de un ámbito pequeño y limitado.

92 Un sistema global para las comunicaciones móviles (global system for mobile communications) (GSM) es un tipo de red que se utiliza para la transmisión móvil de voz y datos.

Desarrollo de la investigación

SHEN-RE comprende tres unidades de negocios:

- SHEN reliability engineering (SHEN-RE).
- SHENPRED.
- SHENSORS.

A continuación, se describe cada una de estas empresas.

- ***SHEN reliability engineering (SHEN-RE)***

Su empresa matriz, ofrece servicios de ingeniería de mantenimiento para la Industria 4.0, así como además servicios de ingeniería e implementación de monitoreo de condición.

Su atención se centra en la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y la detección de fallas de los activos de sus clientes. Por lo anterior, su propuesta de valor principal es el monitoreo integrado.

Dentro de sus áreas de trabajo se encuentran el mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo, la confiabilidad de diseño y capacitaciones.

- ***Ingeniería de mantenimiento predictivo***

Según SHEN-RE, la base de una exitosa estrategia de mantenimiento predictivo es la ingeniería, estableciéndose las condiciones esenciales para la posterior ejecución del monitoreo de condición, lo que involucra tanto a los equipos y procesos, así como además al personal a cargo, desde la identificación de las maquinarias que necesiten monitoreo hasta el impacto que generen los avisos en los planes de mantenimiento.



Ilustración 1: Ingeniería de mantenimiento predictivo. Fuente: shenre.cl.

Desarrollo de la investigación

- Monitoreo integrado

Según esta empresa, el monitoreo integrado es un concepto que reúne distintas estrategias, tanto de mantenimiento, operación y del negocio en general, es decir, no es solamente aplicar monitoreo de condición como algo aislado, sino que además incluye el análisis de las alternativas que más convengan, integrándolas a las condiciones del negocio, tratando de obtener la mejor relación costo-beneficio.

La disposición de distintos equipos y sistemas de monitoreo busca entregar el soporte necesario a fin de aumentar la seguridad y la confiabilidad, lo que puede traducirse en disminución de riesgos y de detenciones no programadas.

Dependiendo de la criticidad de los equipos, se deben seleccionar las estrategias de monitoreo adecuadas para estos. Los sistemas ofrecidos por SHEN-RE pueden ser integrados a sistemas SCADA, lo que puede permitir tomar acciones en el momento mismo que se genere un indicador de falla, lo que evita comprometer otros componentes, disminuyendo el costo de la reparación.

La información de medición permite alimentar motores de aprendizaje a través de algoritmos de inteligencia artificial (AI) y probabilidad condicional. Estos resultados se integran con la experiencia y visión, tanto de SHEN-RE como la de sus clientes, con el fin de tomar acciones correctas en el momento adecuado.

Integrando los sistemas de esta empresa junto con las variables monitoreadas se busca identificar problemas que afecten el rendimiento de los procesos. Para lo anterior, se analizan tendencias en el uso de energía de los equipos monitoreados y el diseño del sistema operacional, con lo que se pueden determinar problemas tales como equipos funcionando fuera de rango de diseño, errores de instalación que degraden el funcionamiento o produzcan pérdidas de energía de las maquinarias debido a rozamientos o vibraciones excesivas. Además, lo anterior puede ayudar en la toma de decisiones para cambiar o reparar los equipos en el momento que sea adecuado, lo que se traduce en mejoras a los planes de mantenimiento.

• *SHENPRED*

Esta empresa entrega servicios de monitoreo de activos, análisis de equipos y servicios de monitoreo de condición. Su propuesta busca estar presente en el lugar y momento preciso, entregando de esa manera la solución que mejor se adecúe para extender la vida útil de las maquinarias de sus clientes y la seguridad de sus procesos productivos.

Desarrollo de la investigación

- Monitoreo de condición

Esta empresa ofrece a sus clientes la implementación de sistemas de monitoreo de condición online, lo que va desde la ingeniería básica hasta la instalación y soporte tanto del sistema de monitoreo, como así además de asistencia en los análisis y diagnósticos de fallas.

Para esta empresa, el concepto de monitoreo de condición establece que cada equipo presenta síntomas o variables intrínsecas que dan señales de su actual condición de operación. Para este propósito, generalmente, se utilizan sensores en línea, tomas de muestras, análisis de desempeño, entre otros. De esa manera, se pueden encontrar cambios en algunas de esas variables lo que puede permitir detectar fallas incipientes de manera oportuna, lo que a su vez puede ser utilizado para planificar y coordinar reparaciones o reemplazos. Un correcto monitoreo se debe basar tanto en el análisis a nivel de componentes, como además de la utilización que estos han tenido, esta tarea debe involucrar tanto a personal de mantenimiento como también de operaciones.

Dentro de sus servicios específicos se encuentran la realización de inspecciones y análisis avanzados. Por otra parte, sus servicios de monitoreo pueden ser de tipo periódico, o bien monitoreo remoto (en línea). A continuación, se describe cada uno de estos servicios.

- Inspecciones

El objetivo de las inspecciones es detectar desviaciones de forma periódica a través de la medición visual y comparación con patrones, esto con la finalidad de diagnosticar satisfactoriamente la condición del equipo. Para ello, se utilizan métodos tales como confección de pautas y procedimientos de trabajo, inspecciones visuales, medición de parámetros y reportes. El beneficio principal es la identificación de desviaciones de equipos y/o sensores.

Las inspecciones permiten detectar desviaciones mediante la medición visual y comparación con patrones, SHENPRED ofrece a sus clientes las herramientas para la realización de estas inspecciones y análisis de diversos tipos de equipos y estructuras.

- Análisis avanzados

El objetivo de estos análisis es detectar y hacer seguimiento en equipos críticos cuya detección de causa raíz de falla es compleja. Para este propósito, se utilizan métodos tales como mediciones y análisis avanzados integrando diferentes técnicas, reportes de diagnóstico y/o pronosis, y monitoreo continuo de la salud de los activos cuando no se pueda realizar intervención inmediata.

Desarrollo de la investigación

Entre los principales beneficios de estos análisis se encuentran la identificación de fallas en equipos complejos, monitoreo de la salud de los equipos en desarrollo, y la documentación para la realización de análisis de causa raíz.

Los análisis complejos contemplan una revisión mediante técnicas específicas para activos en condiciones operacionales especiales, o bien maquinarias que sean consideradas críticas. Lo anterior, a través de planes de Mantenimiento Basado en la Condición (CBM).

- Monitoreo periódico

El objetivo del monitoreo en ruta es poder cumplir con tareas de mantenimiento predictivo basados en un plan matriz. Esto se puede abordar utilizando métodos tales como la definición de una línea base, hacer mediciones y análisis según modos de falla a detectar, y la generación de reportes de condición y diagnóstico.

Entre sus beneficios destacan la identificación de fallas en los equipos y el poder generar las condiciones para implementar planes de Mantenimiento Basado en la Condición (CBM).

El monitoreo en ruta y periódico permite identificar patrones históricos sobre un activo. Para ello, se utilizan herramientas que permitan realizar y analizar las maquinarias de forma periódica, con la finalidad de generar un historial de condición de la maquinaria que permita planificar mantenciones en el momento preciso.

- Monitoreo remoto

La idea principal de este tipo de monitoreo es la utilización de herramientas que permitan monitorear las maquinarias de manera continua y remota, generando reportes periódicos y dando alerta inmediatamente cuando un parámetro medido se escape del rango de los valores normales. Para este propósito, se utilizan métodos tales como la instalación de sistemas de monitoreo continuo, definición de línea base y reportes periódicos de estado, dando aviso inmediato ante cualquier estado anormal de funcionamiento de los activos.

Entre sus beneficios destacan la detección de fallas entre mantenimientos programados, correlación de condiciones operacionales, y la asistencia al personal a cargo del monitoreo de condición entre inspecciones periódicas.

El monitoreo remoto o en línea de los activos permite, por una parte, entregar la seguridad de no tener la necesidad de estar en faena, evitando los potenciales peligros que eso conlleva y, por otra parte, obtener la medición de parámetros de interés.

- **SHENSORS**

Esta empresa ofrece productos tecnológicos relacionados a mantenimiento, esto incluye equipamientos, instrumentos o tecnologías que sean necesarias para la implementación de sistemas de mantenimiento y/o monitoreo de condición de los activos. Su gama fundamental de productos está compuesta por sensores, equipos y software para la ingeniería de mantenimiento. Uno de los productos principales de SHENSORS es el software MODMA⁹³. Este corresponde a una aplicación que apoya la gestión de mantenimiento, enfocado principalmente al área de manejo de activos físicos.

- Software MODMA

Este software está desarrollado como una plataforma que informa, asiste y monitorea máquinas y piezas dentro de un proceso, constituye una herramienta que apoya el mantenimiento, optimizándolo, según esta empresa, en sus principales áreas: mantenibilidad, confiabilidad de equipos, operación confiable y confiabilidad humana.

Su característica modular permite ir agregando técnicas y enfoques según la necesidad del cliente, amoldándose así a su situación de trabajo cotidiana. El acceso a esta plataforma se puede hacer mediante cualquier equipo conectado a la red local o a internet, incluyendo equipos móviles debido a que se consideran fundamentales para el trabajo en terreno.

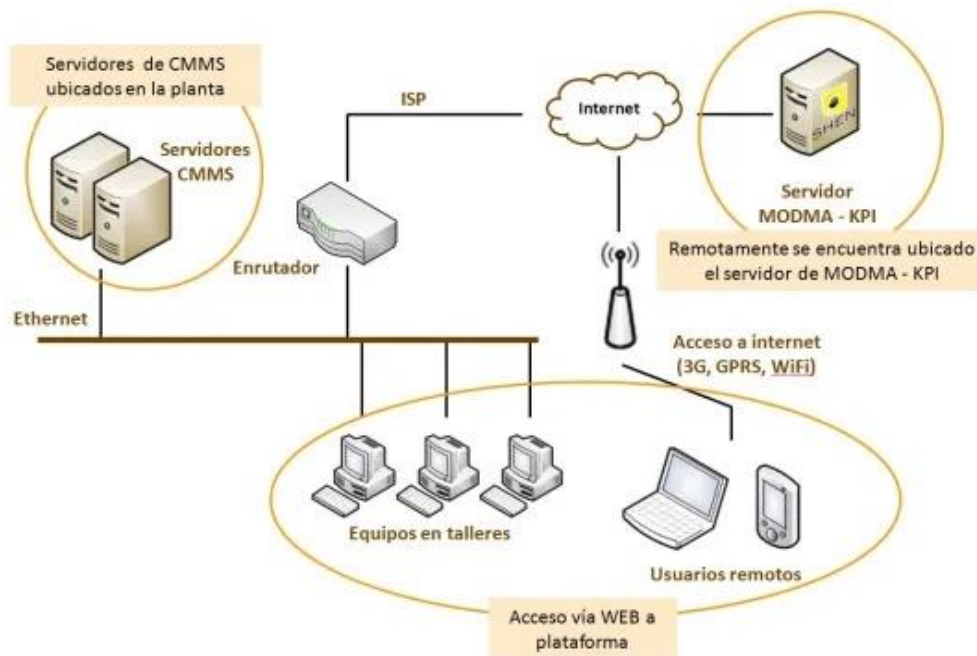


Figura 2: Esquema funcionamiento sistema MODMA. Fuente: shenre.cl.

93 Son las siglas de Modular Maintenance Assistance (MODMA).

4.2.1.3. MCK Analytics

MCK Analytics es una empresa con base en Concepción, región del Biobío, Chile. Se dedica a la prestación de servicios de ingeniería de confiabilidad especializada en la aplicación de analítica avanzada para la toma de decisiones de mantenimiento de activos físicos, optimización en la administración de recursos y aumento de productividad.

Esta empresa pretende garantizar a sus clientes el uso de diversas herramientas predictivas disponibles en el mercado. Para ello, implementa inspecciones en terreno a través de analistas que se encuentran certificados en la utilización de herramientas y conocimientos de técnicas predictivas.

Las herramientas utilizadas por esta empresa cuentan con las rutas de monitoreo previamente cargadas, con la finalidad de facilitar la detección de anomalías en terreno, lo que permite dar aviso de inmediato al personal de planta ante una emergencia.

Esta empresa ofrece principalmente tres servicios:

- Monitoreo de condiciones.
- Análisis de confiabilidad de activos.
- KPI⁹⁴ de resultado y del ciclo de mantenimiento.

A continuación, se describen cada uno de estos servicios.

- ***Monitoreo de condiciones (online y en ruta)***

Esta empresa ofrece contar con diagnósticos oportunos que permitan anticiparse a las fallas, evitar paradas no planificadas y eliminar imprevistos. Su compromiso es entregar información valiosa y oportuna presentada de manera simple y rápida que permita diagnosticar problemas, advertir incumplimientos, disminuir pérdidas, ahorrar tiempo valioso y eliminar imprevistos.

MCK Analytics trabaja en base a un método de diagnóstico de fallas que se desarrolla mediante la herramienta denominada triángulo de la confiabilidad.

94 Un indicador clave de rendimiento (key performance indicator) (KPI), conocido también como indicador clave o medidor de desempeño, es una medida del nivel del rendimiento de un proceso. El valor del indicador está directamente relacionado con un objetivo fijado previamente. Normalmente se expresa en valores porcentuales.

Desarrollo de la investigación

Las estrategias que componen este triángulo son:

- Análisis de vibraciones.
- Análisis de lubricantes.
- Interpretación de imágenes termográficas.

Además de lo anterior, se basan en un método de cinco fases, el que pretende garantizar a sus clientes reportes confiables y oportunos, apoyo en el cierre de ciclo de las averías y efectividad del servicio de monitoreo de condiciones. Estas cinco fases contemplan:

- Fase 1: Priorización.
- Fase 2: Ruta del sensor.
- Fase 3: Estandarización.
- Fase 4: Operación.
- Fase 5: Cierre de ciclo.

Establecen una política de excelencia operacional, aplicación de modernas herramientas con personal calificado y trabajo estandarizado en normas ISO, lo que busca garantizar a sus clientes contar con reportes confiables como una herramienta estratégica en el camino hacia la transformación digital. Todo lo anterior, busca generar un impacto en el ROI⁹⁵ de las empresas, prometiendo obtener un ROI de 10 veces lo invertido, además de reducir las fallas en un 70% y los costos en un 20%.

- ***Análisis de confiabilidad de activos (ISO 55.000)***

Este punto busca prolongar la vida útil de los activos hasta la vida de diseño, esto debido a que la ingeniería de confiabilidad tiene por objetivo final prolongar la vida útil de los activos físicos incluso más allá de la vida de diseño. Los análisis de confiabilidad son fundamentales en el rol fiscalizador que debe asegurar un correcto punto de operación y una óptima estrategia de mantención.

- ***KPI de resultado y del ciclo de mantenimiento***

El desempeño de un equipo de mantenimiento se puede medir y evaluar mediante la revisión periódica de indicadores (KPI) a través de la creación de un tablero de gestión. El objetivo de esta herramienta es controlar la disciplina en el ciclo de mantenimiento, lo que se considera clave para alcanzar las metas establecidas por las organizaciones.

95 El retorno sobre la inversión (return on investment) (ROI) es una métrica usada para saber cuánto la empresa ganó a través de sus inversiones. Para calcular el ROI es necesario levantar los ingresos totales, sustraer de estos los costos y, finalmente, dividir ese resultado por los costos totales.

4.2.1.4. EVTECH

EVTECH soluciones integrales es una empresa de monitoreo de condiciones de maquinarias, determinación de salud de activos, y sistema integral de inspecciones de mantenimiento preventivo. Para ello, la empresa busca determinar los beneficios y ahorros del mantenimiento de planta, generar información respecto a la salud de cada activo, y fortalecer la filosofía de inspecciones basadas en mantenimiento preventivo.

La empresa busca entregar soluciones integrales, sin grandes costos o inversión inicial, low cost⁹⁶, almacenamiento en la nube, gestión bajo analistas certificados Mobius Institute⁹⁷, y gestión de informes mensuales.

EVTECH implementa sistemas de monitoreo seguro y/o monitoreo online. En ese sentido, la empresa realiza seguimientos de tendencias, estados de activos según variable, y determinación de fallos prematuros.

Sumado a lo anterior, esta empresa brinda servicios de monitoreo de condición IIoT⁹⁸ y mantenimiento de precisión⁹⁹ de activos, además de soluciones de eficiencia energética en sistemas de aire y gases comprimidos, basados en IIoT. La empresa ha desarrollado un modelo basado en inteligencia artificial (AI) que le permite analizar las maquinarias detectando pérdidas y fallos hasta niveles incipientes.

Los principales servicios que ofrece a sus clientes esta empresa son:

- Monitoreo de condición IIoT para maquinarias.
- Monitoreo de condiciones y mantenimiento de precisión.
- Auditoría de eficiencia energética: IIoT para aire comprimido.

A continuación, se detallan cada uno de estos servicios.

96 El término bajo costo o low cost hace referencia a un modelo de negocios que se basa principalmente en la reducción de costos, lo que propicia una baja en el precio de venta. En este modelo se ofrece un producto básico, funcional, sin extras, pero de la misma calidad que el producto tradicional equivalente.

97 Mobius Institute y sus socios en todo el mundo ofrecen cursos públicos, capacitación en el sitio y educación basada en la web, lo que conduce a la certificación acreditada para profesionales de confiabilidad de activos, especialistas en monitoreo de condiciones y técnicos de mantenimiento de precisión.

98 El internet industrial de las cosas (industrial internet of things) (IIoT) es el conjunto de sensores, instrumentos y dispositivos autónomos conectados a través de internet a aplicaciones industriales.

99 El mantenimiento de precisión consiste en realizar operaciones de reparación siempre dentro de límites de tolerancia establecidos por rigurosos procedimientos.

Desarrollo de la investigación

- **Monitoreo de condición IIoT para maquinarias**

Este servicio se desarrolla a través de un modelo basado en inteligencia artificial (AI) que permite analizar las maquinarias y detectar fallos en niveles incipientes. A través del tiempo, se aplica una serie de estudios y técnicas, relacionadas a la ciencia de datos, las que pretenden involucrar todas las variables existentes y transformarlas en información de interés para el mantenedor, operador mantenedor, y todos los involucrados con el bienestar de las maquinarias.

La solución de monitoreo de condición IIoT busca permitir a sus clientes disfrutar de los beneficios de un sistema de monitoreo online con tecnología de punta, sin tener que recurrir a grandes inversiones o gastos en adquisición de tecnología, gozando de un servicio integral que suministra la tecnología durante la duración del contrato de prestación de servicios. Además, esta solución es complementada con servicios periódicos programados con el fin de aumentar la confiabilidad, lo que pretende ir más allá de los modos de falla detectables con el monitoreo online.

Entre los beneficios que esta propuesta de valor pretende entregar a sus clientes destacan:

- Prevenir daños a las maquinarias.
- Reducir los riesgos operativos.
- Costos de servicio más bajos.
- Maximización del tiempo de actividad de las maquinarias.
- Mejoramiento del servicio al cliente.
- Preparar el negocio para el futuro (integración con la Industria 4.0).

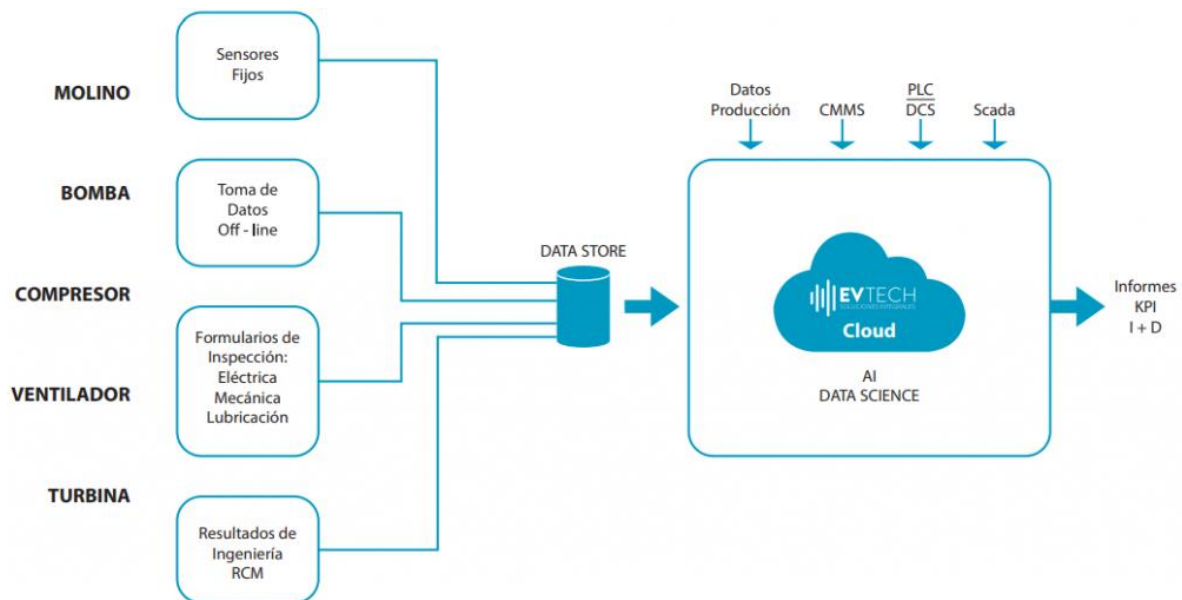


Figura 3: Esquema servicio monitoreo de condición IIoT para maquinarias. Fuente: evtech.cl.

- ***Monitoreo de condiciones y mantenimiento de precisión***

Este servicio se basa en la implementación de soluciones a través de paquetes innovadores con técnicas especializadas que permiten determinar los posibles fallos potenciales en los equipos, con el fin de programar actividades correctivas, sin afectar la productividad de la empresa del cliente. Con ese propósito, EVTECH utiliza tecnología y equipos avanzados, esto gracias a que es socio comercial para Latinoamérica y Chile de líderes en tecnología de sensores, acelerómetros, monitores, cables, periféricos y componentes.

- ***Auditoría de eficiencia energética: IIoT para aire comprimido***

La empresa ofrece soluciones de eficiencia energética en sistemas de aire y gases comprimidos. Este servicio puede proporcionar a sus clientes los siguientes entregables:

- Informe de monitoreo de condición de cada compresor.
- Estudio energético en la generación de aire.
- Estudio energético en las líneas de consumo de aire comprimido.
- Informes de averías.

4.2.1.5. Quant

Quant es un proveedor de mantenimiento industrial presente a nivel mundial. Su sede principal se encuentra en Estocolmo, Suecia. Cuenta con más de 30 años de experiencia, se caracteriza por ser una compañía internacional con foco en Europa y América, estando presente en diversos países, entre ellos Chile.

Según su propia definición, el mantenimiento inteligente se logra gracias a un enfoque de mantenimiento sistemático con herramientas digitales integradas para impulsar la sostenibilidad, el rendimiento de la planta, la optimización de costos y la seguridad.

El núcleo de su propuesta de valor consiste en mejorar la seguridad, crear equidad organizacional, impulsar el rendimiento de la planta y alinear los costos. Su enfoque consiste en establecer a la función de mantenimiento como una contribución a la rentabilidad, y no como un costo.

Esta empresa sostiene que la digitalización es un pilar fundamental del concepto de mantenimiento inteligente. Quant promete a sus clientes tener la capacidad de identificar, integrar y aplicar nuevas tecnologías y soluciones, de una manera ágil, segura y rentable.

Desarrollo de la investigación

Entre su alcance de servicios se encuentran:

- Planificación estratégica del mantenimiento.
- Fiabilidad centrada en el mantenimiento.
- Ejecución de mantenimiento.
- Mejora del rendimiento de la planta.
- Gestión de la cadena de suministro y piezas de repuesto.
- Gestión del ciclo de vida de los activos.
- Gestión de parada de planta.
- Organización, personas y cultura.

Por otra parte, la cartera de digitalización diseñada sistemáticamente por Quant incluye productos tales como quantShield, quantEffect, quantPredict, entre otros. Sin embargo, si bien cada producto digital tiene un propósito distinto, la propuesta de esta empresa es que puedan trabajar juntos de manera fluida, creando un ecosistema de mantenimiento de vanguardia para las organizaciones.

A continuación, se describen sus principales productos.

- ***Mida y maximice el OEE: quantEffect***

Esta herramienta permite la medición precisa y automática de la eficiencia general de los equipos (OEE)¹⁰⁰, siendo una solución basada en la nube con interfaces fáciles de usar, incluso en dispositivos móviles. También es escalable desde una sola máquina hasta plantas de producción en varios sitios. Su implementación pretende ser fácil y rápida.

- ***Predecir y prevenir fallos: quantPredict***

Esta herramienta corresponde a un sistema de monitoreo de condición basado en la nube, es compatible con varios fabricantes de sensores, así como también con varios tipos de sensores como, por ejemplo, de vibración, de presión, temperatura, corriente, entre otros.

Dispone de límites de alarma para múltiples parámetros de estado de los activos, generando notificaciones automáticas a diversos sistemas de mantenimiento CMMS/GMAO. Constituye un soporte de mantenimiento basado en el tiempo de funcionamiento de las maquinarias.

¹⁰⁰ La eficiencia general de los equipos o efectividad total de los equipos (overall equipment effectiveness) (OEE) es una razón porcentual que sirve para medir el aprovechamiento integral de la maquinaria industrial.

- ***Sistema de gestión de mantenimiento: quantWorx***

Este software pretende mejorar la eficiencia operativa, disminuyendo las actividades de administración, utilizando para ello una interfaz extendida hacia las operaciones. Este sistema promete a sus usuarios mejorar la calidad de la gestión de datos, convergiendo la información sobre único soporte. Además de lo anterior, busca aumentar la transparencia, así como también generar oportunidades de detección de anomalías, resaltando las potencialidades y nuevas oportunidades de mejora en la gestión de mantenimiento.

- ***Aumente la seguridad y la sostenibilidad: quantShield***

Esta herramienta permite potenciar la cultura de seguridad, proporcionando información instantánea sobre los peligros de seguridad. Además, promete simplificar la mejora continua y el intercambio de conocimientos, esto a través de mayor transparencia y gestión del desempeño.

- ***Panel de control del sitio personalizado: quantNumbers***

El objetivo de esta herramienta es ser utilizada para el análisis en profundidad de datos operativos y de negocios. Puede ser compartido o entregado a los clientes que cuenten con algún sistema de inteligencia de negocios¹⁰¹. Contribuye en la gestión completa de indicadores clave de rendimiento (KPI).

- ***Inspecciones seguras y flexibles: quantDrone***

A través de la utilización de drones, se realizan inspecciones visuales y térmicas de diversas estructuras. Esto contribuye a la detección temprana de problemas estructurales (integridad estructural, corrosión, etc.), así como también en la mejora de la fiabilidad de los activos, estableciendo una función de control del deterioro de las maquinarias, otorgando una seguridad mejorada al respecto.

101 Se denomina inteligencia empresarial, inteligencia de negocios, inteligencia comercial o business intelligence (BI) al conjunto de estrategias, aplicaciones, datos, productos, tecnologías y técnicas enfocadas a la administración y creación de conocimiento sobre el medio, a través del análisis de los datos existentes en una organización o empresa.

4.2.2. Descripción de la demanda relacionada a la industria minera

4.2.2.1. Baterías

Son diversas las señales que ha dado la industria minera en cuanto su interés en la utilización de vehículos eléctricos en sus diversas actividades. Por ejemplo, en el artículo titulado *“Las mineras lideran la carga de los vehículos eléctricos a batería”*, Tony Sprague, Gerente del Grupo de Estudios Direccionales e Innovación de Newcrest Mining¹⁰², señala la necesidad urgente por utilizar vehículos mineros eléctricos a batería (Equipo Minero, 2022), lo que va de la mano con algunos proyectos innovadores que están acelerando su viabilidad.

Los objetivos de descarbonización que se han fijado grandes y medianas mineras se traduce en el establecimiento de condiciones significativas para la remoción de los motores diésel de las minas subterráneas y de superficie. En este sentido, la contribución que los vehículos eléctricos a batería podrían tener en los propósitos relacionados a reducir las emisiones de carbono producto de las actividades operativas resulta innegable.

Tony Sprague explica los principales motivos de esta necesidad en la industria minera al señalar que *“En el futuro, las minas subterráneas y de superficie se profundizarán, y más operaciones pasarán a la operación autónoma. Los vehículos eléctricos a batería deben desempeñar un papel de apoyo a estos requisitos. Pero, aun así, es imperativo que eliminemos rápidamente el diésel de las minas subterráneas por razones de salud y seguridad.”* (Equipo Minero, 2022).

Además de lo anterior, existe un tema relacionado a los costos asociados a la utilización de diésel. En el mismo artículo se señala que, actualmente, muchos proyectos mineros nuevos están comenzando a incorporar los precios sombra¹⁰³ del carbono en su economía, esto no se trata de si se les pondrá precio a las emisiones de carbono, sino de cuándo. Por lo tanto, la eliminación del diésel del transporte en todas las operaciones mineras futuras no solo mejorará la economía de los proyectos, sino que además demostrará un enfoque más responsable hacia la extracción de minerales.

102 Newcrest Mining Limited es una compañía australiana creada en el año 1966. Sus oficinas centrales se encuentran en Melbourne. Corresponde a una de las 10 principales compañías mineras de oro del mundo y el mayor productor de oro de Australia.

103 El precio sombra es el valor que presenta un bien determinado, teniendo en cuenta que no existe un precio definido de dicho bien en el mercado. Aunque no presente un precio concreto, este se le atribuye en función del costo que tendría dicho bien en un mercado de competencia perfecta, incluyendo los costos asociados.

Por otra parte, la aplicación de métodos de mantenimiento predictivo en baterías puede resultar altamente relevante debido a que, principalmente, los automóviles modernos, en especial los relacionados a electromovilidad, están siendo sometidos a grandes exigencias.

El gran número de consumidores eléctricos y sistemas de asistencia presente en este tipo de automóviles, en especial en los nuevos modelos, ha aumentado considerablemente el consumo de energía. En este sentido, se estima que en los últimos 20 años la cantidad de consumidores eléctricos se ha incrementado un 750% (VARTA, 2019).

Dado lo anterior, resulta lógico plantear que las probabilidades de fallas también se incrementarán de acuerdo con estos nuevos usos.

La asociación automovilística alemana ADAC¹⁰⁴ ha comprobado lo anterior a través de estudios estadísticos de averías o fallas, comprobando que la mayoría de estas se deben al mantenimiento deficiente de las baterías. Estos estudios estadísticos han revelado que, actualmente, el 39,9% de todas las averías o fallas de automóviles son causadas por baterías en mal estado o descargadas. Estas averías o fallas se pueden evitar realizando comprobaciones periódicas o monitoreos constantes de las baterías (VARTA, 2019).

Como se mencionaba, el número de consumidores eléctricos se encuentra en aumento. El mayor consumo de electricidad debido a este creciente número de consumidores eléctricos y asistentes electrónicos es uno de los motivos del aumento también de las averías o fallas.

La carga a la que se someten las baterías es inclusive mayor en los vehículos con sistemas start stop¹⁰⁵. En este caso, se debe suministrar energía eléctrica a todos los consumidores incluso con el motor apagado, teniendo que soportar la batería los continuos ciclos de carga y descarga.

Se proyecta que las baterías de automóviles probablemente tendrán aún más trabajo. Por ejemplo, con la introducción de los vehículos con red de a bordo¹⁰⁶, crece la demanda de un sistema de almacenamiento de energía eficiente y potente.

104 El Club General de Automovilistas Alemanes (Allgemeiner Deutscher Automobil Club) (ADAC) es la asociación automovilística más grande de Europa. Fue fundada en el año 1903. Su sede principal se encuentra en Múnich, Alemania.

105 El sistema start stop es una tecnología que permite apagar el motor automáticamente cuando el automóvil se detiene, por ejemplo, frente a un semáforo. Gracias a esto, es posible ahorrar energía y reducir las emisiones de carbono.

106 Se denomina red de a bordo al conjunto de componentes eléctricos y electrónicos en vehículos. La red de a bordo es responsable del suministro eléctrico y el flujo de información entre componentes y dispositivos de mando. Además, también es sinónimo de la corriente eléctrica o la corriente nominal a bordo de los vehículos.

Todo lo anterior, constituye un panorama en que los sistemas de mantenimiento predictivo, como los de la metodología PHM, serán protagonistas en este sector, ya que la dependencia de una batería que funcione en óptimas condiciones irá aumentando y cobrando cada vez más relevancia en relación con la seguridad.

Se estima que el mantenimiento predictivo y el monitoreo de forma constante de las baterías serán tan relevantes como cambiar los neumáticos de los vehículos, cambiar el aceite, o bien la reparación del aire acondicionado.

4.2.2.2. Bombas industriales

En la industria minera, un activo fundamental en la infraestructura son las bombas industriales¹⁰⁷, ya que resulta indispensable manejar cualquier tipo de fluidos químicos con el fin de extraer, procesar y acabar minerales valiosos o algún tipo de material geológico de la tierra. Su gran eficacia para trasladar fluidos las convierte en una herramienta clave para las operaciones mineras. Entre los diversos usos de las bombas industriales están los procesos de reducción de dimensiones para homogeneizar el mineral en polvo, procesos de división o separación y procesos de refinación.

En el artículo titulado *“Bombas y válvulas: apuntando a un mejor desempeño”* de la revista digital Minería Chilena, se menciona que el monitoreo, control de procesos, mejores materiales, mayor resistencia y reducción de costos asociados a la operación y mantenimiento, son parte de las tendencias que se observan en los equipos de impulsión de agua (Minería Chilena, 2015).

Según la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), el uso de agua de mar por parte de la minería del cobre equipararía al de agua fresca hacia el año 2026. Se prevé que en los próximos diez años el consumo de agua proveniente del océano se multiplique 4,3 veces hasta llegar a 10,7 m³/s desde los 2,5 m³/s actuales, mientras la demanda por agua fresca caiga en un 19% hasta 10,8 m³/s. Ello, como respuesta de la industria a la escasez del recurso hídrico, que ha obligado a reestructurar las fuentes de origen de este.

107 Una bomba industrial es una máquina que transforma la energía mecánica que absorbe de un motor eléctrico, térmico, u otros, y la transfiere a un fluido como energía hidráulica, lo cual permite que el fluido sea transportado de un lugar a otro, a un nivel o a diferentes niveles.

Desde el punto de vista financiero, dado el contexto económico que enfrenta la minería, las compañías mandantes necesitan invertir a menor costo en sus proyectos. En relación con el creciente uso de agua de mar en minería, este desafío se transforma, entonces, en la necesidad de innovar y mejorar la eficiencia y resistencia de las bombas industriales que transportarán el fluido que llegará a las faenas mineras, considerando en muchos casos diferencias de altura significativas entre el punto de bombeo y la operación.

En ese sentido, Daniel Ponce, Gerente de Ventas de ITT¹⁰⁸ para Chile, señala que *“han surgido distintas innovaciones, entre ellas, el control automático y monitoreo por medio de sensores en las bombas en funcionamiento, el uso de otro tipo de materiales más resistentes a la salinidad del agua, y el mejoramiento de los acabados interiores de las bombas”* (Minería Chilena, 2015).

Además de lo anterior, se destaca el avance tecnológico en el control de equipos. Al respecto, Daniel Ponce agrega que *“En una impulsión de agua de mar no hay sólo una bomba, sino que varias trabajando en paralelo, en consecuencia, el modo en que se opere ese conjunto de equipos, y si están siendo utilizados en su mejor punto de diseño, hará de una operación más o menos eficiente”* (Minería Chilena, 2015), señalando además el hecho de que se han desarrollado tecnologías de control y monitoreo que ayudan a seleccionar una buena combinación de dispositivos.

Como se puede apreciar, el hecho que se introduzcan herramientas tecnológicas como sensores y sistemas de monitoreo sirve de habilitantes para implementar potencialmente la metodología PHM.

Claramente, un sistema de bombeo no se puede mantener por sí mismo. La frecuencia de mantenimiento no será la misma para todas las bombas, sino que variará de acuerdo con sus aplicaciones y modos de uso, con las condiciones del servicio y con la calidad de las bombas industriales según sus precios. Una bomba que maneje líquidos limpios, no corrosivos, requerirá mucho menos mantenimiento que una bomba del mismo tamaño y tipo que tenga que utilizar líquidos corrosivos o arenisca. En este sentido, cabe destacar que la metodología PHM precisamente toma en cuenta estos factores al momento de la generación de modelos para su implementación.

108 ITT es una compañía manufacturera global. Fue fundada en el año 1920 bajo el nombre de International Telephone & Telegraph. ITT es un fabricante líder diversificado de componentes críticos de alta ingeniería y soluciones tecnológicas personalizadas para los mercados de la energía, el transporte y la industria. En el rubro de aguas, ITT es el mayor proveedor mundial de bombas y sistemas de transporte, tratamiento y control del agua y otros líquidos.

Se puede visualizar, además, que realizar inspecciones periódicas o un monitoreo continuo resultará más económico que reparar las averías o fallas.

En general, relacionado al mantenimiento de bombas industriales, en el mercado se encuentra el mantenimiento programado, el que suele asociarse al tipo de mantenimiento preventivo. Por otra parte, si bien existe oferta relacionada a mantenimiento predictivo, la implementación de estos servicios se relacionan a observar las bombas en operaciones normales, comprobar la temperatura de los rodamientos, tanto en las bombas como en los motores, hacer un análisis de vibraciones en cada apoyo de los elementos en rotación, observar el desempeño de las bombas con respecto a la curva de rendimiento¹⁰⁹, y observar si existen posibles fugas, sin embargo, para poder llevar a cabo esas tareas, es necesario sacar las bombas de servicio, drenarlas y hacer una medición con un equipo ultrasonido, por lo que se pueden reanudar las operaciones solamente terminado ese proceso. En ese sentido, se debe mencionar que la metodología PHM busca evitar que los activos tengan que ser sacados de servicio, ya que a través de la utilización de herramientas propias de la Industria 4.0 se pretende sentar las bases para la optimización del uso de los activos.

Existe en el mercado una amplia gama de bombas industriales, pero todas tienen en común el hecho de que el mantenimiento, en especial predictivo, tiende a ser cada día más necesario, con la finalidad de evitar las averías o fallas, así como además alargar su vida útil lo máximo posible.

Es así como estos precedentes sirven para visualizar, por una parte, la necesidad en esta área de utilizar metodologías de mantenimiento predictivo y, por otra parte, el potencial requerimiento de aplicación de principios relacionados a la metodología PHM.

4.2.2.3. Correas transportadoras

Dentro de los activos más importantes utilizados por las empresas mineras se encuentran las correas transportadoras. Se estima que se utilizan miles de kilómetros de estos elementos para el transporte de material a granel. Los sistemas de correas transportadoras se componen de varios elementos.

¹⁰⁹ Las curvas de rendimiento de una bomba son esencialmente datos sobre la capacidad de una bomba determinada para producir flujo contra cierta altura. Cuando se está leyendo una curva, el flujo de la bomba está en la parte superior e inferior y su altura para empujar está en los lados.

El artículo titulado *“Correas transportadoras: mayor conocimiento y tecnología”* da cuenta de que la certificación, profesionales capacitados y sobre todo la confiabilidad son elementos importantes para tener en cuenta en el ámbito de las correas que transportan minerales, especialmente ante requerimientos de mayor velocidad y pendientes más agresivas (Minería Chilena, 2015).

A principios del siglo XX, aparecieron los primeros sistemas de correas transportadoras capaces de transportar carbón, minerales y otros productos y, desde entonces, representan un eslabón fundamental en las operaciones de la industria minera. Por esa razón, sus proveedores están buscando nuevas formas para extender no solo su vida útil, sino también su confiabilidad (Nueva Minería y Energía, 2019). Sin embargo, a pesar de esta relevancia, el proceso de mantenimiento sigue siendo, generalmente, de carácter reactivo, es decir, relacionado al mantenimiento de tipo correctivo.

Se estima que se pierden miles de dólares por hora a causa de la falla de un sistema de correa transportadora. Esto ocurre debido a la falta de mecanismos apropiados para el monitoreo constante y la integración de este proceso a sistemas que ayuden a un mantenimiento eficiente.

La gran cantidad de partes móviles en las correas transportadoras hacen que las inspecciones y el mantenimiento sean tediosos y peligrosos. Además, la alta tasa de transferencia de materiales de la mayoría de estas maquinarias hace que cualquier tiempo de inactividad del sistema se traduzca en pérdidas significativas de producción. Sumado a todo lo anterior, muchas veces las poleas de la cinta (polea motriz, de cola, deflectoras y de contrapeso) tienen ubicaciones que complican su inspección.

El requisito fundamental para poder aplicar técnicas de mantenimiento predictivo en correas transportadoras es que la falla incipiente genere señales o síntomas de su existencia, tales como desalineación, roces de estructuras, ruidos, entre otros.

Las técnicas para la detección de defectos y fallas en estas maquinarias varían desde la utilización de datos de control de procesos y de control de calidad, así como también el uso de herramientas estadísticas, hasta las técnicas de aporte tecnológico como la medición de espesores, radiografías con correa detenida y en movimiento, escáneres, termografía, tribología¹¹⁰, temperatura, sensores u otros.

110 La tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento.

Desarrollo de la investigación

Para que un programa de mantenimiento predictivo se considere efectivo en correas transportadoras se debe lograr incrementar la confiabilidad y el desempeño operacional del conveyor¹¹¹ mientras que, al mismo tiempo, asegurar que se cumplan los siguientes objetivos de mantenimiento:

- Conocer los diferentes modos de falla y los efectos negativos que estos causan sobre la maquinaria (análisis de fallas).
- Conocer las ventajas y limitaciones de las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo para así seleccionar la técnica más aplicable y justificable económicamente.
- Contar con un equipo de técnicos altamente competentes en las técnicas de mantenimiento predictivo.
- Cambiar la cultura de mantenimiento correctivo y/o preventivo a un enfoque de mantenimiento predictivo.

Es así como la inspección de las correas transportadoras tiene por finalidad determinar el estado actual de sus componentes, con el fin de reducir al mínimo el tiempo de inactividad, detectando de modo temprano las fallas que puedan generarse, lo que implicaría, al mismo tiempo, poder otorgar medidas correctivas a tiempo, sin llegar a una falla crítica.

Por lo anterior, en los últimos años se han incorporado varias mejoras a las correas transportadoras a través de la instalación de sensores electrónicos en vez de mecánicos, lo que puede otorgar la capacidad de detectar fallas y disminuir los tiempos de mantención, ya que las alertas se pueden realizar de manera temprana.

Por otra parte, en el mercado se encuentran señales de interés por contratar servicios de monitoreo de fallas. Un ejemplo de lo anterior es el Terminal Graneles del Norte (TGN), en la comuna de Mejillones, región de Antofagasta, quienes contrataron los servicios de monitoreo wireless¹¹² en el año 2018 a la empresa SHENPRED, quienes instalaron y dieron soporte a un sistema de monitoreo inalámbrico en una correa transportadora de 1,7 km y en equipos críticos del puerto de carbón de la misma empresa. A esos datos etiquetados se les aplicaron algoritmos de aprendizaje para las clasificaciones de falla.

111 Un sistema conveyor o sistema de bandas transportadoras es un conjunto de equipos que facilita el transporte de mercancías. Se compone de gran variedad y cantidad de transportadores generalmente fijos, los cuales pueden tener funciones extras para selección automática de mercancías.

112 En un sentido amplio, wireless es un término utilizado para definir la transmisión de datos entre una variedad de dispositivos, sin conexiones por cables, es decir, de forma inalámbrica, a través de ondas electromagnéticas.



Ilustración 2: Monitoreo correa transportadora Terminal Graneles del Norte (TGN). Fuente: shen-re.cl.

El caso anterior constituye solamente un ejemplo dentro de muchos otros que demuestran preocupación por mantener un monitoreo constante de las correas transportadoras, por supuesto para establecer un plan de mantenimiento que aminore la detención de estas, afectando con ello la producción.

Dado lo anterior, se puede estimar que un sistema de mantenimiento basado en la metodología PHM puede contribuir en solucionar esta gran preocupación de la industria minera, ayudando no tan solo al cuidado de las correas transportadores, sino que además otorgando la posibilidad de mejorar las políticas de mantenimiento debido a que esta metodología, a través del cálculo de la vida útil remanente (RUL), puede dar aviso de una eventual falla en el futuro de estas maquinarias dando el tiempo suficiente para tomar decisiones respecto el modo de uso de las correas transportadoras.

4.2.2.4. Máquinas rotativas

Este tipo de activos son máquinas eléctricas que transforman una corriente eléctrica en un trabajo mecánico rotativo. Esta rotación puede aplicarse a diferentes elementos accesorios para realizar trabajos como las bombas, compresores, o sistemas de transporte, entre otros.

Son gran parte de las máquinas eléctricas que pueden encontrarse en cualquier proceso industrial. En particular, en industrias pesadas o de minería son el corazón de los sistemas de transporte de materias (Sigma Industrial Precision, 2022).

Desarrollo de la investigación

Se estima que entre los principales fallos que presentan estas maquinarias están el sobrecalentamiento del motor, cortocircuitos, y fuga constante de corriente a tierra. Por lo anterior, conocer el estado de las máquinas rotativas resulta clave para un mantenimiento eficiente y, de paso, mantener el rendimiento del activo.

Disponer del estado de salud de estas maquinarias de manera continua y de alertas que indiquen la necesidad de mantenimiento puede permitir evitar las paradas no programadas, lo que puede ahorrar miles de dólares en pérdidas de producción, mantenimientos no necesarios o destrucción de activos críticos y de difícil sustitución en la planta.

Dado lo anterior, se puede establecer que la implementación de tecnologías y herramientas relacionadas a la metodología PHM destinadas al monitoreo del estado de salud de máquinas rotativas puede traducirse en un factor clave a la hora de pretender aumentar la eficiencia de los procesos llevados a cabo a través de la utilización de estas maquinarias.

En el proceso de investigación de la oferta de servicios de mantenimiento industrial dentro del mercado nacional, se pudo visualizar el hecho de que existen empresas relacionadas a mantenimiento preventivo y predictivo que prestan servicios de monitoreo de condición de máquinas rotativas a la gran minería, lo que constituye una señal de la preocupación de mantener en óptimas condiciones estas maquinarias.

Una de las variables más relevantes a la hora de poner atención en el cuidado de este tipo de activos es el denominado balanceo dinámico en máquinas rotativas. En ese sentido, se señala que, al revisar el desempeño de una máquina eléctrica rotativa, uno de los aspectos más importantes es constatar que el desbalance se encuentra dentro de un rango admisible de funcionamiento, el que se verá reflejado en el estado vibratorio de estas maquinarias. De ese modo, al realizar un análisis de vibraciones, es posible determinar si la causa raíz es un desbalance y qué medidas son necesarias para corregir esa situación.

Dicho lo anterior, se establece que una de las principales fuentes de vibración en máquinas rotativas es el desbalance, lo que se relaciona con la actuación de fuerzas no deseadas. Por lo tanto, los departamentos de confiabilidad y mantenimiento deben ocuparse de identificar la presencia de cualquier desbalance fuera de los rangos admisibles. El desbalance produce un aumento de las amplitudes de vibración en máquinas rotativas. Esta condición se presenta porque el centro de gravedad de un cuerpo que gira no coincide con su centro de rotación.

Desarrollo de la investigación

Si se pretende afrontar el problema antes descrito, la metodología PHM, a través del monitoreo de indicadores de salud (HI) para cada estado de salud (HS) que se proponga, por ejemplo, uno relacionado al desbalance en este caso, puede generar modelos que contribuyan en la solución de estas problemáticas.



Ilustración 3: Monitoreo de estado máquina rotativa. Fuente: new.abb.com.

Para lo anterior, se puede hacer uso de sensores dispuestos en puntos específicos de la máquina rotativa, de tal manera de captar las señales de vibración que puedan servir de generación de datos que, luego de la aplicación, por ejemplo, de algoritmos de aprendizaje automático, puedan contribuir en la construcción de los modelos señalados, los que, por un lado, pueden determinar la vida útil remanente (RUL) de la maquinaria, pero, además, ayudar en establecer mejoras en los planes o políticas de mantenimiento.

Sin embargo, una variable también relevante es que exista el personal capacitado para tomar decisiones respecto la intensidad de uso del activo una vez conociendo la información proporcionada por los modelos predictivos señalados.

4.2.2.5. Molino SAG

Los molinos son fundamentales para el procesamiento de minerales. Dentro de las actividades de la industria minera son las maquinarias que se utilizan para moler o mezclar materiales para ser utilizados en procesos de mezclado de minerales.

Desarrollo de la investigación

Generalmente, los dos tipos de molinos mayormente utilizados por la industria minera nacional son el de bolas y el semiautógeno (molino SAG), sin embargo, ambos cumplen la misma finalidad de reducir el tamaño de los minerales.

El molino semiautógeno, o también conocido como molino SAG, es un equipo utilizado en plantas mineras para moler rocas de mineral para reducir su tamaño y hacerlo apto para las etapas siguientes de procesamiento de ese mineral. Los molinos SAG habitualmente contienen revestimientos (liners) que se van desgastando debido al impacto que producen las rocas de mineral en su interior.

En temas de mantenimiento, habitualmente para este tipo de activos son realizadas tareas de mantenimiento de tipo preventivo (programado), lo que hace necesario la detención de la maquinaria. Se estima que la producción aproximada de una planta concentradora es de 150.000 t/día. Por lo tanto, un cambio de revestimientos llevado a cabo a través de un mantenimiento programado puede perjudicar directamente la producción.

Dicho lo anterior, se puede visualizar la necesidad de reducir los tiempos destinados a mantenimiento de los molinos SAG para que, de esa manera, se puedan alcanzar mayores horas de producción en un tiempo determinado, lo que contribuya en el desempeño de las empresas mineras que utilizan en sus actividades habituales este tipo de maquinarias.

Por otra parte, en el mercado minero nacional existen diversos antecedentes que dan cuenta de la alta relevancia de mantener estos activos en óptimas condiciones.

Por ejemplo, durante el año 2009, Minera Escondida¹¹³ produjo 1.102.976 toneladas métricas de cobre fino, un 12% menos que en el año 2008, siendo una de las causas principales de esa disminución la falla de uno de sus molinos SAG que experimentó seis detenciones entre agosto del año 2008 y junio del año 2009. Las detenciones del molino sumaron una interrupción de 263 horas, las que fueron consecuencia de fallas a tierra¹¹⁴ de bobinas con la consecuente detención del molino (Minería Chilena, 2010). Es así como la reparación del molino SAG era una decisión crítica para la compañía debido a que, principalmente, significaba la detención de la planta concentradora, generando una gran disminución de la producción de cobre fino.

113 Minera Escondida es una empresa minera dedicada a la extracción de cobre. Su yacimiento geológico principal de explotación es La Escondida, la mina a tajo abierto de mayor producción de cobre del mundo. La Escondida se encuentra ubicada a 170 km al sureste de la ciudad de Antofagasta, región de Antofagasta, Chile.

114 Una falla a tierra ocurre cuando la corriente eléctrica no completa su circuito, sino que pasa a tierra en un lugar inesperado. Las fallas a tierra pueden ocasionar incendios y son peligrosas cuando pasan a través de una persona en su trayecto a tierra.



Ilustración 4: Molino SAG. Fuente: ecominingconcepts.cl.

Por otra parte, se debe mencionar que el molino SAG es uno de los equipos de mayor consumo de energía eléctrica dentro del proceso minero, por lo que resulta indispensable que su operación sea eficiente desde el punto de vista energético. La operación eficiente de un molino SAG depende del adecuado conocimiento y manejo de las variables de control, como, por ejemplo, el flujo y densidad de alimentación, la granulometría y dureza del material, la carga de bolas y la velocidad de giro, entre otras.

Estas variables inciden sobre la producción y la potencia de operación de un molino SAG, lo que determina directamente el consumo específico de energía (CE) del equipo, el que corresponde a un indicador de su eficiencia de operación. La gran cantidad de variables que inciden en el CE de un molino SAG se traducen en una gran dificultad para determinar si la tendencia de una variable específica podría o no influir en el aumento del CE sobre un límite que se considere apropiado. Si el CE se calcula en tiempo real, solo es posible reaccionar a un aumento crítico de su valor cuando la condición ineficiente de operación ya ha sucedido, perdiéndose tiempo y energía en la normalización a una condición de mejor desempeño.

Con el objetivo de evitar eventos donde el consumo específico de energía (CE) del molino SAG sobrepase un límite o meta establecida, se hace necesario desarrollar sistemas predictivos que sean capaces de anticipar el comportamiento del CE dadas las condiciones de operación del molino SAG (Eco Mining Concepts, 2019).

Lo anterior requiere modelar correctamente la compleja interacción entre cada una de las variables de operación y su efecto en el consumo específico de energía (CE).

En este sentido, la utilización de herramientas propias de la Industria 4.0 como, por ejemplo, la inteligencia artificial (AI), el aprendizaje automático, el aprendizaje profundo, entre otras, aparecen como una importante alternativa para afrontar esos desafíos, utilizándolas en la generación de modelos que contribuyan a predecir eventuales eventos catastróficos en el funcionamiento de los molinos SAG.

En ese contexto, la implementación de la metodología PHM puede potencialmente contribuir de manera altamente significativa en la creación de esos modelos, abriendo, de paso, la posibilidad de optimizar las aplicaciones y modos de uso de este tipo de activos.

4.3. Aspectos fundamentales de la metodología PHM

4.3.1. Análisis de las principales características

El concepto de mantenimiento predictivo junto con los conocimientos y herramientas propias de la Industria 4.0, las que fundamentalmente se relacionan a la inteligencia artificial (AI), han dado paso a lo que se conoce como mantenimiento industrial 4.0, donde los datos juegan un rol primordial, por lo tanto, su obtención, recopilación, análisis y almacenamiento resultan vitales a la hora de plantear estrategias de mantenimiento predictivo, especialmente si se pretenden implementar a través de la metodología PHM.

Se debe agregar que, en particular para lograr un refinamiento de los análisis que puedan ser generados a partir de la utilización de la metodología PHM, resulta altamente recomendable incorporar el concepto de datos contextuales¹¹⁵, es decir, incluir una categoría de datos con información del registro de eventos de falla u otros registros asociados, que no son necesariamente información que proviene de los sensores o dispositivos de captación de señales o datos, sino que más bien provienen desde sistemas de gestión de mantenimiento y/o registro de errores, contextualizando la situación en que ocurrieron esos eventos de fallas.

¹¹⁵ Los datos contextuales son datos que dan contexto a una persona, entidad o evento. Los datos contextuales se utilizan para proporcionar más información y contexto sobre los datos con el fin de lograr un mejor análisis de estos.

Por otro lado, el mantenimiento industrial 4.0 requiere de la interconexión de la información recopilada desde los activos y/o procesos, así como además de idealmente entrecruzamiento de datos, utilizando las tecnologías pertinentes para aquello, lo que puede traducirse en la necesidad de inversión de parte de las empresas, en particular las relacionadas a la industria minera, por lo que indudablemente la decisión de invertir o no en estas tecnologías podría eventualmente condicionar la implementación de la metodología PHM.

Sin embargo, un factor que puede propiciar la aceptación de la implementación de la metodología PHM puede ser el uso, de parte de variadas empresas, en especial del sector minero, de sistemas de Mantenimiento Basado en la Condición (CBM). Esto debido a que este tipo de mantenimiento, para ser llevado a cabo, utiliza el desarrollo de diversas tecnologías tales como redes inalámbricas, sensores de alta precisión, software de análisis, entre otras, lo que permite la recopilación de datos en intervalos o de manera continua como puede ser, por ejemplo, el caso de maquinaria que cuente con sensores internos.

Los dispositivos y sistemas mencionados, además de la utilización de las denominadas tecnologías habilitantes¹¹⁶, constituyen lo que se caracteriza y denomina como habilitantes para la implementación de la metodología PHM, es decir, lo que sirve de base para establecer las condiciones y herramientas adecuadas para llevar a cabo esta metodología.

Dentro de estos habilitantes, la incorporación de inteligencia artificial (AI), internet de las cosas (IoT), aprendizaje automático, redes neuronales, ciencia de datos, macrodatos, computación de borde, procesamiento de datos en tiempo real, entre otros, son factores claves y diferenciadores de la metodología PHM respecto otras propuestas. Esto debido a que los beneficios de implementar desarrollos basados en estas tecnologías para determinar el estado de los activos, además de contribuir a la predicción de las fallas o eventuales fallas de estos, pueden resultar altamente estratégicos para una organización, ya que resulta claro visualizar que la ocurrencia de paradas no programadas de los activos, o bien el sometimiento de las maquinarias a operaciones que aceleren su degradación, puede traducirse en grandes pérdidas, lo que podría reflejarse eventualmente, por ejemplo, en indicadores financieros tales como el CAPEX¹¹⁷, o bien el OPEX¹¹⁸.

116 Las tecnologías habilitantes son las herramientas que permiten a las empresas desarrollar el proceso de transformación digital, adaptarse a la Industria 4.0 y al modelo de la fábrica inteligente.

117 Las inversiones en bienes de capital, gastos en capital o capital expenditure (CAPEX) son inversiones de capital que crean beneficios.

118 Los gastos de funcionamiento, gastos operativos, gastos operacionales u operational expenditures (OPEX) son costos permanentes para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema.

Ahora bien, otra diferencia que se establece es que la metodología PHM se lleva a cabo mediante dos fases que se complementan, la primera, la fase de diagnóstico, detecta, ubica e identifica las anomalías actuales presentes en los activos analizados, lo que permite establecer el estado de salud de los sistemas monitoreados, la segunda, la fase de pronóstico, se centra en comprender los eventos futuros, esto a través de diversos modelos que permitan calcular la vida útil remanente (RUL) de las maquinarias. Estas dos fases resultan una disrupción respecto las otras dos metodologías de mantenimiento predictivo expuestas, además sirven para proporcionar dos visiones relevantes en temas de mantenimiento, por una parte, conocer el estado de salud actual de la maquinaria lo que contribuye a la toma de decisiones de mantenimiento y, por otra parte, conocer el tiempo que resta para que se produzca un evento futuro que puede llevar incluso al colapso de la maquinaria de acuerdo a la utilización que se esté haciendo de esta, contribuyendo de esta manera a minimizar los tiempos de inactividad por sucesos inesperados o eventuales fallas de sistemas complejos.

Se ha expuesto además que los desarrollos en técnicas de monitoreo de condición, sumado a la utilización de tecnologías habilitantes, han hecho posible la recopilación de grandes cantidades de datos que, además, pueden ser procesados en tiempo real mediante la utilización de modelos predictivos que proporcionan información valiosa que sirva para respaldar el proceso de toma de decisiones de mantenimiento, brindando con ello una solución eficiente para maximizar la disponibilidad de los activos monitoreados.

Otro punto relevante por destacar es el hecho que el uso de la metodología PHM ha contribuido en hacer posible la implementación de nuevos conceptos relacionados al mantenimiento, como lo es el e-maintenance, tal como se pudo comprender en los casos de estudio, donde además se pudo visualizar como los modelos de control de degradación de activos pueden ayudar a sustituir a planes de mantenimiento basados, por ejemplo, en políticas de mantenimiento preventivo (programado).

A partir también de la revisión de los casos de estudio, se puede visualizar la capacidad que tienen las propuestas a partir de la metodología PHM de integrarse a otros sistemas tales como los sistemas SCADA, sumado a que la investigación y revisión de distintas fuentes da la posibilidad de incluir a otros sistemas presentes en las industrias, en particular la minera, como son los PLC¹¹⁹, o software con características similares a los CMMS/GMAO vistos en la revisión de la oferta relacionada a mantenimiento industrial.

119 Un controlador lógico programable (programmable logic controller) (PLC) es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial para automatizar procesos electromecánicos, electroneumáticos o electrohidráulicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje u otros procesos de producción.

Desarrollo de la investigación

Se pudo constatar también que, dentro de la operación de diversos activos, las señales de vibración, temperatura y presión suelen ser utilizadas en la implementación de la metodología PHM, esto es posible debido fundamentalmente al uso de sensores adecuados para cada una de esas variables, lo que hace posible a su vez el diseño de funciones de detección de salud de los activos.

Continuando con la idea anterior, la metodología PHM considera también el diseño de funciones de razonamiento de salud, las que incorporan variables relacionadas a las incertidumbres que pueden presentar diversos procesos, lo que puede ser muy valioso considerando que, a mayor tiempo de uso que puedan llegar a tener los activos, estos tenderán de forma natural a presentar mayores rangos de incertidumbre en su rendimiento futuro, sin embargo, la generación de este tipo de funciones pueden contribuir a predecir los estados desconocidos de las maquinarias.

Posteriormente, la implementación de la metodología PHM implica el diseño de funciones de pronóstico y gestión de salud las que, mediante la definición previa de indicadores de salud (HI) y estados de salud (HS), permiten predecir la vida útil remanente (RUL) de los activos monitoreados.

Esta información permite a los operadores de los activos programar de manera eficiente las acciones de mantenimiento, previniendo, de paso, que se produzcan fallas catastróficas, lo que puede traducirse en menores costos asociados a la gestión de mantenimiento de activos, lo que, al mismo tiempo, puede permitir mejorar la eficiencia de estos procesos traduciéndose, finalmente, en un aumento en la competitividad de estas organizaciones a través del logro de una mejor gestión de sus activos.

Descrito lo anterior, sumado a la investigación general sobre la metodología PHM realizada fundamentalmente a través de la revisión de la literatura asociada, se puede especular que la aplicación de la metodología PHM puede dar origen a diversas consecuencias positivas a diversas industrias, en especial la minera, en cuanto su implementación dentro de las estrategias de mantenimiento de sus activos, esto debido principalmente a la utilización de las bondades de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0. Entre estas potenciales consecuencias positivas en los planes de mantenimiento se pueden establecer:

- Aumentar la eficiencia.
- Capacidad de monitorear el desgaste de las maquinarias.
- Capacidad de predicción de fallas en activos fijos.
- Contribuir en mejorar la competitividad de las empresas mineras.
- Optimizar los procesos de mantenimiento.
- Reducir los costos asociados.

Otros conceptos adicionales que deben ser incorporados a la visión que se tenga de la metodología PHM es lo referente a las aplicaciones y modos de uso. El primer concepto hace referencia a los activos específicos en los que será aplicada la metodología PHM y, el segundo, a las actividades, el cómo y la intensidad con que serán utilizados estos activos.

Con respecto a la generación de potenciales propuestas de valor, se puede mencionar que la metodología PHM tiene la virtud de poder convertirse en un producto cuyas características pueden, por un lado, ser adaptables, es decir, aprovechar la versatilidad de la metodología y, por otro lado, tener características de empaquetamiento, lo que va relacionado a lo estandarizado¹²⁰.

En el primer caso, es decir, las propuestas adaptables, están relacionadas a los procesos de producción de cada actividad dentro de una industria, en este caso la minera, dado que, dependiendo del activo, de las aplicaciones o modos de uso, serán distintos los modelos que se deban usar, así como también la manera en que sean monitoreadas las maquinarias y las herramientas que sean utilizadas para ese propósito.

Sin embargo, es importante mencionar en este punto que puede generarse lo que se conoce como aprendizaje por transferencia¹²¹, lo que puede permitir a las propuestas basadas en la metodología PHM tener características de escalabilidad¹²².

En el segundo caso, es decir, las propuestas estandarizadas, estas se relacionan al hecho de tener características replicables en situaciones similares, por ejemplo, generar algoritmos relacionados a PHM que puedan ser estandarizados para ciertos activos o actividades mineras cuyas características y contextos sean similares.

Algo también importante de mencionar sobre las posibles propuestas de valor de la metodología PHM, es que estas pueden tener como clientes no necesariamente al usuario final, sino que, por ejemplo, pueden ser proveedores. Lo anterior, constituye una razón adicional para que resulte interesante analizar el mercado minero, debido a que cuenta con múltiples proveedores, tanto de maquinarias como de servicios.

120 La estandarización es el proceso mediante el que una serie de procesos se ajustan o se adecúan a un estándar, es decir, adaptar los procesos a un modelo que se considere de referencia.

121 El aprendizaje por transferencia (transfer learning) es un problema de investigación en el aprendizaje automático que se centra en almacenar el conocimiento adquirido mientras se resuelve un problema y se aplica a un problema diferente, pero que esté relacionado.

122 La escalabilidad significa que un proyecto tiene el potencial de incrementar sus ingresos a un ritmo muy veloz sin la necesidad de aumentar los recursos utilizados en la misma proporción.

Desarrollo de la investigación

Una propuesta de valor podría ser, por ejemplo, el hecho de integrar los modelos de la metodología PHM a los sistemas de información de las empresas relacionadas a la industria minera, o bien dar otros usos a las herramientas propias de la Industria 4.0 presentes en estas organizaciones, agregando valor a sus aplicaciones o modos de uso habituales.

Adicionalmente a lo anterior, se debe considerar que resulta relevante que exista personal técnico capacitado que pueda interpretar los indicadores que arroje la aplicación de la metodología PHM, por ejemplo, la estimación de la vida útil remanente (RUL). Esto resulta clave si se tiene presente que una de las orientaciones principales de la metodología PHM es contribuir al mejoramiento de los programas de mantenimiento, ya que el monitoreo de componentes, además de dar aviso de una posible falla, arrojará valores para la vida útil remanente (RUL).

Se debe enfatizar que otra de las innovaciones profundas de esta metodología es la incorporación del concepto de incertidumbre, ya que, si se da aviso de que el activo va a fallar, habrá una existencia probabilística de falla en determinados rangos de tiempo. Esto es una diferenciación adicional a las propuestas presentes analizadas en la oferta de servicios de mantenimiento industrial y resulta una característica altamente relevante para que el personal apropiado pueda tomar las decisiones pertinentes o programar medidas para afrontar las situaciones de falla o eventuales fallas en el futuro, tomando decisiones, por ejemplo, de cuánto se estará dispuesto a arriesgar los activos.

Sobre este último punto, es importante recalcar la alta relevancia del conocimiento experto de quienes utilicen estas herramientas para la toma final de decisiones al respecto, de acuerdo con, por ejemplo, los modos de uso de las maquinarias.

Además, es importante la información que se pueda tener del historial de la operación o del fabricante, o bien el propietario del activo debe contar con sistemas de adquisición y almacenamiento de datos, así como también con sistemas de monitoreo en intervalos o de manera continua de las señales de las maquinarias.

4.3.2. Modelos de propuestas de valor de la metodología PHM

4.3.2.1. Baterías de ion de litio: electromovilidad

Como se mencionó en la descripción de algunos de los potenciales activos demandantes de servicios como los proporcionados por la metodología PHM, uno de los temas que está tomando cada vez más relevancia dentro del contexto minero es el uso de baterías, en particular el uso de vehículos eléctricos, lo que se relaciona con la electromovilidad.

La electromovilidad es un tema que no tan solo preocupa al sector minero, sino que es una preocupación a nivel nacional. Una señal potente en ese sentido es el denominado Compromiso Público Privado por la Electromovilidad 2022 en el que el gobierno de Chile presenta un nuevo acuerdo para impulsar la electromovilidad. Esta es una iniciativa del Ministerio de Energía y la Comisión Nacional de Energía (CNE). Se estima que la implementación de electromovilidad reducirá en un 20% las emisiones de carbono de nuestro país, lo que va en la línea del desafío de reducir completamente estas emisiones de carbono para el año 2050.

- ***Caracterización de los potenciales demandantes***

Son diversas las empresas de distintos sectores económicos de nuestro país, incluidas las relacionadas al rubro minero, que se encuentran potenciando el uso de la electromovilidad, un ejemplo lo constituye Komatsu¹²³, empresa que se encuentra impulsando alianzas para el desarrollo de camiones mineros cero emisiones. Al respecto, Darko Louit, CEO de Komatsu para Latinoamérica, ha expresado su valoración en la participación de distintos socios de Komatsu para el desarrollo de esta iniciativa, pues permitirá un avance todavía más concreto para fomentar el uso sustentable de las energías, comentando que *“Komatsu posee una agenda de desarrollo tecnológico sustentable muy nutrida que apunta a la eliminación de emisiones en el uso de nuestros equipos tanto en el mercado minero de superficie y subterráneo como de construcción, donde la electromovilidad y el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno juegan un rol fundamental”* (Komatsu, 2022).

Otro ejemplo similar lo constituye Minera Candelaria¹²⁴, empresa que ha adquirido silenciosos buses eléctricos con baterías de litio, con un total de 18 buses, que son utilizados para el transporte de trabajadores de la empresa.

El artículo titulado *“SQM alcanza flota de vehículos eléctricos más grande de la minería nacional”* (Reporte Minero, 2022), destaca que la flota de la compañía minera cuenta con 34 transportes, tanto de materiales como de personal. Es así como en el marco del desarrollo de la electromovilidad, SQM ha logrado contar con la flota de vehículos eléctricos más grande de la minería en el país, con un total de 34 transportes dentro de los que se encuentran buses de pasajeros, minibuses, camionetas, garitas móviles solares y el primer camión eléctrico de alto tonelaje.

123 Actualmente Komatsu Chile tiene equipos en los principales yacimientos mineros del país. Komatsu Chile también es líder en venta de equipos para las áreas de construcción y forestal, en donde con una completa gama de productos, cumple con las necesidades de su amplia cartera de clientes.

124 Minera Candelaria es una productora de concentrado de cobre, localizada en la comuna de Tierra Amarilla, ubicada aproximadamente a 30 kilómetros al sur de Copiapó, región de Atacama, Chile.

Sobre esto último, se espera que la presencia de vehículos eléctricos mineros de grandes dimensiones crezca en las actividades propias de este sector. Por ejemplo, la compañía Epiroc AB¹²⁵, ha lanzado al mercado variadas máquinas para minería que funcionan con baterías. Entre estas, se halla un camión con capacidad para 42 toneladas que puede movilizarse fácilmente por túneles, calificado como el vehículo más grande para trabajos mineros subterráneos. La compañía tiene dentro de sus planes la producción de una máquina cargadora eléctrica de 18 toneladas y empezará a ofrecer torres de perforación. Un claro indicio de lo que se viene en este mercado que, según cifras de IDTechEx¹²⁶, alcanzará los 9 mil millones de dólares en el año 2028.

Cabe señalar que el Consejo Internacional de Minería y Metales, así como además sus principales proveedores, anunciaron que planean reducir para el año 2025 el impacto operacional del escape de diésel, y que esperan contar en el año 2040 con vehículos de minería de superficie libres de emisiones de gases de efecto invernadero.

- ***Variables por considerar***

Se estima que el ion de litio se ha posicionado dentro de las tecnologías de baterías para vehículos eléctricos. La densidad energética y los ciclos de vida de carga son los principales atributos de estos equipos, según especialistas en la materia.

El ion de litio es, hoy por hoy, la principal tecnología que se utiliza en baterías para autos eléctricos a nivel nacional e internacional, esto de acuerdo con las estimaciones realizadas por ESK Consulting¹²⁷, quienes en su momento proyectaron un crecimiento de siete veces en la demanda de este recurso entre los años 2018 al 2025, con una capacidad total de 700.000 GWh que serán consumidas en electromovilidad (ElectroMov, 2019).

Diversos especialistas señalan que las baterías de ion de litio se caracterizan por su densidad energética, además de que pueden duplicar su vida útil respecto a otras tecnologías pensadas para la electromovilidad. Es así como se establece que las dos principales características en torno a las baterías para electromovilidad son la densidad energética y el ciclo de vida. La primera se debe entender como la cantidad de energía que se puede almacenar por kilo de batería y, la segunda, como la cantidad de ciclos de carga y descarga completa que podrá realizar la batería antes de dejar de ser útil para un vehículo.

125 Epiroc AB es un fabricante sueco de equipos de minería e infraestructura. Su sede está en Estocolmo, Suecia. Dispone de fábricas en Suecia, Estados Unidos, Canadá, Australia, China, India, Japón y Alemania.

126 IDTechEx, desde el año 1999, ha proporcionado estudios de mercado independientes, inteligencia comercial y eventos sobre tecnologías emergentes a clientes en más de 80 países.

127 ESK Consulting está ubicada en La Mirada, California, Estados Unidos. Esta empresa es parte de la industria de servicios de consultoría administrativa, científica y técnica.

Desarrollo de la investigación

Otras variables importantes a considerar es que el uso de tecnología 5G, así como la capacidad de sensorización, pueden ayudar en el desarrollo de la electromovilidad, lo que va en directa relación con una mayor cantidad y velocidad en la transmisión de datos, siendo este precisamente uno de los principales aspectos que destacan los especialistas, esto resulta relevante para profundizar en el desarrollo de redes inteligentes, aprendizaje automático, inteligencia artificial (AI) y la medición de los consumos eléctricos asociadas a estos vehículos.

- ***Elaboración de la propuesta de valor***

A raíz de los antecedentes expuestos para el uso actual y futuro que se espera de las baterías de ion de litio, se puede proyectar un aumento en los requerimientos de mantenimiento de estos dispositivos dado el incremento de sus posibles aplicaciones y modos de utilización, así como además la alta relevancia que tendrá el hecho de que estos dispositivos no fallen y trabajen sin mayores sobresaltos en el tiempo, aumentando su vida útil y otorgando un insumo de energía constante independiente de los niveles de requerimientos a que sean sometidas, ya sean estos leves o intensivos.

Sumado a lo dicho anteriormente, se encuentra disponible además variada teoría que puede apoyar o mejorar los procesos de mantenimiento de estos dispositivos, los que van en la línea del mantenimiento predictivo, siendo eso, al mismo tiempo, uno de los pilares a futuro para una completa ejecución de los conceptos relacionados a la metodología PHM.

La propuesta de valor de la implementación de la metodología PHM para el uso de baterías de ion de litio se basará en:

- Generación y análisis de modelos de degradación con los datos obtenidos del comportamiento de las baterías.
- Aplicación de algoritmos de aprendizaje automático para el monitoreo en tiempo real del estado de salud de las baterías.
- Estimación de la vida útil remanente (RUL) de las baterías de ion de litio.
- Mejorar los sistemas y programas de mantenimiento de las baterías en cuanto toma de decisiones operacionales y optimización del uso de estas a futuro.

Respecto a la teoría aplicable para poder diseñar e implementar estos ítems se encuentran las investigaciones presentadas en el Anexo 2.

- ***Propuesta de valor***

La propuesta de valor de la implementación de la metodología PHM en cuanto el uso de baterías de ion de litio se basa en la generación y análisis de modelos de degradación, utilizando para ello los datos obtenidos directamente de las baterías.

Lo anterior se puede abordar utilizando herramientas tales como, por ejemplo, aprendizaje automático, lo que permitirá el monitoreo en tiempo real del estado de salud de estas, generando al mismo tiempo una estimación de la vida útil remanente (RUL) de las baterías, dando esto como resultado poder mejorar tanto los sistemas de mantenimiento como la programación de estos, permitiendo la toma de decisiones por parte del personal que administre el activo que hace uso de las baterías.

Se debe recordar que la metodología PHM en su diseño, primero que todo, dependerá de las aplicaciones en donde opere la batería, así como, posteriormente, de los modos de uso a los cuales sea sometida. En base en lo anterior, se procederá a realizar caracterizaciones probabilísticas de los perfiles de uso de las baterías, indicadores de los estados de salud y, finalmente, establecer un pronóstico de falla en tiempo real, esto último gracias al monitoreo de la evolución temporal de la degradación de las baterías.

La implementación de la metodología PHM debe contemplar la evaluación de factibilidad técnica, para establecer las posibles fallas que pueda tener la batería acorde a los datos disponibles. Para estos propósitos se suele utilizar, por ejemplo, herramientas de gestión de calidad como el análisis FMECA. Luego se procede a la caracterización de los perfiles de uso de la batería, así como a implementar un módulo de estado de salud que sea acorde a la aplicación y modo de uso al que estará siendo sometida la batería. Finalmente, se implementa el módulo de pronóstico de falla, utilizando toda la información previa, estimando la vida útil remanente (RUL) de la batería en tiempo real, lo que constituye una clara diferencia con los métodos o técnicas empleadas actualmente en el mercado.

- ***Beneficios***

Entre los beneficios destaca que se podrá contar en todo momento con información crítica para la toma de decisiones y optimización de los planes de mantenimiento. La aplicación de la metodología PHM ayudará en la detección temprana de problemas o anomalías a partir de señales de las baterías y, como se ha mencionado, poder con ello optimizar los programas de mantenimiento. Finalmente, esto también beneficiará en el establecimiento de un mantenimiento proactivo, es decir, sabiendo las razones de falla poder incorporar mejoras en el proceso de mantención que permitan evitar aquellas fallas en el futuro.

Desarrollo de la investigación

La implementación de la metodología PHM en las baterías de ion de litio, permitirá resolver o estar mejor preparado para enfrentar las posibles problemáticas habituales relacionadas con esta clase de dispositivos.

La metodología PHM es una herramienta que podrá contribuir a resolver el problema de saber cuántos ciclos de carga aún le quedan a la batería, optimizar las cargas y descargas, maximizando con ello el número de estos ciclos de carga.

En resumen, la implementación de la metodología PHM en las baterías de ion de litio ofrece ser una propuesta relevante en cuanto a la administración de las cargas, mejorando la cantidad de ciclos de carga, permitiendo finalmente con ello aumentar la vida útil de las baterías, así como además la capacidad de estas.

En un futuro, se espera que esta metodología sea un pilar para la optimización del uso de las baterías inclusive de manera online, otorgando, por ejemplo, rutas de desplazamiento que optimicen el uso de las baterías en aplicaciones de electromovilidad.

4.3.2.2. Rodamientos

La función de los rodamientos es contribuir en el movimiento, giro o rotación de las piezas o componentes de las diversas maquinarias. Actualmente, los rodamientos son una de las piezas mecánicas más utilizadas, su movimiento giratorio facilita todos los desplazamientos, contribuyendo además a reducir la fricción entre los distintos elementos móviles.

Los rodamientos pueden ser de muchos tipos, entre estos encontramos los de bolas, de rodillos o de agujas. Los elementos rodantes son los que transmiten las cargas de las piezas móviles de la máquina a los soportes fijos.



Figura 4: Esquema tipos de rodamientos. Fuente: nskamericas.com.

- ***Caracterización de los potenciales demandantes***

Los rodamientos constituyen un elemento esencial en una amplia variedad de maquinarias tanto industriales como de la vida común. Se encuentran en los electrodomésticos, motocicletas, automóviles, equipos de aire acondicionado, equipos de generación de energía, entre otros.

Puntualmente, en el sector minero, los rodamientos están en las correas transportadoras, máquinas rotativas, molinos SAG, perforadoras mineras, entre otras maquinarias. En la actividad minera puede resultar de vital importancia poder aumentar la disponibilidad de estos equipos, sin embargo, suelen existir diversos inconvenientes, por ejemplo, una pérdida de disponibilidad por fallas en los procesos tiene relación con los activos del área de secado. El mejoramiento de las operaciones del área de secado pasa por aplicar metodologías que sirvan para establecer las principales causas de tiempos de detención, siendo una de ellas las fallas relacionadas a los rodamientos de los ventiladores de tiro inducido de secado. Dentro de las metodologías para abordar este tema se puede encontrar una ampliamente utilizada dentro de la gestión de calidad, la denominada Lean Six Sigma¹²⁸, particularmente la herramienta denominada DMAIC¹²⁹.

La identificación oportuna de fallas en rodamientos antes de interrumpir la operación, o bien afectar la calidad de la producción, es el elemento fundamental que debe contener cualquier programa de mantenimiento predictivo.

- ***Variables por considerar***

Una característica principal de los rodamientos es que su vida útil no está en relación con su desgaste, sino que la determina la fatiga de las superficies que soportan las tensiones repetitivas de trabajo normal. Los daños por fatiga se manifiestan en el cuarteamiento y picado progresivo de las superficies del aro de rodamiento y elementos rodantes, siendo esa la clave para conocer su vida útil.

Todos los rodamientos tienen que funcionar con una baja fricción, tener un funcionamiento silencioso, deben necesitar poco lubricante, presentar poco desgaste y tener una prolongada vida útil.

128 Lean Six Sigma es una metodología de mejora de procesos que busca establecer herramientas estadísticas y análisis de datos para una aplicación práctica en los proyectos de mejora de la calidad de los procesos.

129 DMAIC es un acrónimo de los términos definir, medir, analizar, mejorar y controlar (define, measure, analyze, improve and control). DMAIC es un enfoque de resolución de problemas basado en datos que ayuda a realizar mejoras y optimizaciones incrementales en los productos, diseños y procesos comerciales. Fue creado en la década de 1980 como parte de la metodología Six Sigma por el ingeniero de Motorola, Bill Smith.

Desarrollo de la investigación

Existe una fórmula matemática simple que conviene tener en cuenta en la duración de los rodamientos. Como la carga determina la intensidad del esfuerzo en las superficies de los aros y elementos rodantes, al aumentar la carga disminuye la duración del rodamiento, y al revés. De esta forma, la vida útil del rodamiento es inversamente proporcional al cubo de la carga, al doblar la carga la duración del rodamiento disminuye ocho veces.

El análisis de espectros de velocidad y aceleración, por ejemplo, de un rodamiento de bolas defectuoso, permite reconocer de una manera relativamente fácil la falla, en particular gracias a las gráficas de amplitud-frecuencia, caracterizándose por tener muchos puntos máximos en sus curvas junto con altas frecuencias y de variable amplitud que dependerá de la gravedad del problema (Embidi, 2017).

La frecuencia a la que se produzca la máxima amplitud dará una idea del elemento defectuoso del rodamiento. Por otra parte, los defectos en elementos rodantes o en las pistas de rodamiento generan fuerzas que se transmiten al alojamiento y estructura que los rodea. Dado lo anterior, para poder detectar el tipo de fallo que existe se deberá obtener la frecuencia a la que la amplitud es mayor y comparar con el espectro de un rodamiento sin defectos.

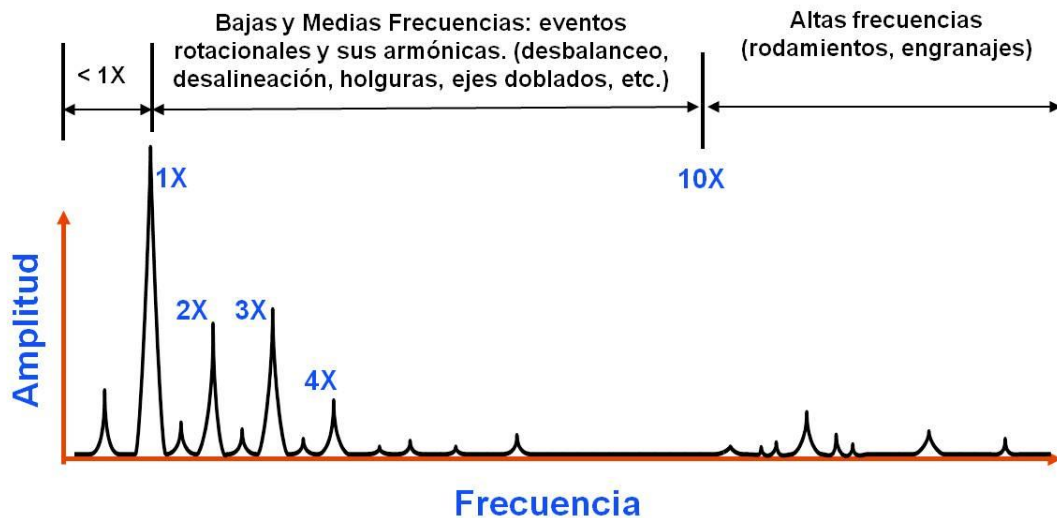


Gráfico 4: Modelo espectral. Fuente: seas.es.

- **Elaboración de la propuesta de valor**

En lo relacionado al mantenimiento predictivo y la detección de defectos en rodamientos, se puede mencionar que los fallos en los elementos del rodamiento originan vibraciones a frecuencias muy altas, las que no están relacionadas con la velocidad de rotación y de amplitud también aleatoria.

Desarrollo de la investigación

La recopilación de datos, análisis de información histórica de fallas, y la evaluación de la operación de los equipos rotatorios en forma periódica, permite identificar los posibles fallos en rodamientos antes de que lleguen a ser catastróficos.

Sin lugar a duda, dadas las diversas maquinarias que utilizan rodamientos dentro de la industria minera, los diagnósticos automáticos y los cálculos de la duración de vida útil remanente (RUL) de los rodamientos son componentes altamente relevantes por considerar dentro de la Industria 4.0.

La idea es, por supuesto, que estos activos funcionen prácticamente sin interrupción, lo que hace naturalmente necesario un mantenimiento de características intensivas para prevenir las paradas no programadas de la producción o funciones operativas.

Lo anterior se traduce en que es de vital importancia que los operadores conozcan en todo momento la condición de los componentes de accionamiento, así como además comprender que los rodamientos son particularmente relevantes como elementos centrales de las máquinas.

Los sistemas de monitoreo de condición permiten el diagnóstico automático de la condición de los rodamientos y los componentes de la maquinaria. Por otra parte, los datos obtenidos se pueden almacenar en la nube, lo que permite utilizarlos para otras mediciones.

La propuesta de valor de la implementación de la metodología PHM relacionada a rodamientos se basará en:

- Implementación de un sistema adecuado de sensores que ayuden en la recopilación de datos de los activos y sus rodamientos.
- Implementación de un sistema de monitoreo de condición que permita establecer el estado de salud de los activos.
- Modelos de simulación que permitan calcular la vida útil remanente (RUL) considerando las aplicaciones y tipos de uso de las maquinarias.
- Una interfaz que permita a los clientes acceder a esta información, con la finalidad de mejorar sus planes de mantenimiento, lo que a su vez mejorará las operaciones y aumentará el rendimiento.

Respecto a la teoría aplicable para poder diseñar e implementar estos ítems se encuentran las investigaciones presentadas en el Anexo 3.

- ***Propuesta de valor***

Se partirá implementando un sistema de sensores que permitan la recopilación de datos desde las maquinarias y sus rodamientos, estableciendo un sistema de monitoreo de condición lo que permitirá, por ejemplo, que, si una falla es detectada a través de estos sistemas, se deba tomar una decisión respecto a si la falla es tan grave como para realizar un mantenimiento.

Por otra parte, se espera que idealmente se cuente con información disponible en el historial de operación de los activos, y hacer seguimiento de procesos que cuenten con sistemas de adquisición de datos y monitoreo continuo de señales.

Para el análisis de las maquinarias se procederá a la generación de modelos de degradación, haciendo uso de algoritmos de aprendizaje automático, y monitoreo en tiempo real de la salud de los activos, todo esto para posteriormente entregar un tiempo estimado del fin de su vida útil.

La idea es diseñar e implementar sistemas de mantenimiento predictivo a partir de las herramientas y técnicas utilizadas por la metodología PHM. Lo anterior puede ser apoyado por el conocimiento empírico de los equipos y conocimiento experto que permita, por una parte, mejorar la toma de decisiones operacionales y, por otra parte, optimizar la operación de cada maquinaria.

El monitoreo de condición tiene como finalidad proporcionar información sobre la condición real de la maquinaria, mientras que el mantenimiento predictivo busca permitir predecir el momento óptimo para llevar a cabo las labores de mantenimiento.

Lo anterior, constituye una herramienta potente para optimizar la programación de la producción. De esta forma, el mantenimiento de los activos utilizados en los procesos de producción puede realizarse en función de las condiciones de carga conforme los requerimientos, dejando de lado el programar los mantenimientos en intervalos específicos o, lo que es peor, realizando mantenimientos correctivos al encontrar averías graves.

- ***Beneficios***

Entre los beneficios del establecimiento de un mantenimiento predictivo se encuentra el aumento de la productividad debido a una fuerte correlación entre el nivel de utilización de la capacidad de producción y la condición de los componentes de las máquinas.

Desarrollo de la investigación

Otro beneficio considerable es que las piezas de repuesto pueden ser solicitadas bajo la filosofía justo a tiempo (JIT)¹³⁰, lo que contribuye, por ejemplo, a reducir costos de almacenamiento.

En general, la idea del mantenimiento predictivo es, fundamentalmente, extender el periodo hasta la próxima mantención, reduciendo de esa manera el tiempo fuera de operación y aumentar el rendimiento.

Una característica sorprendente es que inclusive en caso de daños incipientes en un rodamiento, el mantenimiento predictivo a partir de la metodología PHM puede seguir siendo de ayuda, por ejemplo, si el operador tiene conocimiento de cuánto tiempo continuará funcionando un rodamiento, puede tomar oportunamente la decisión sobre si debe continuar con la producción o no.

Finalmente, aplicando un plan de mantenimiento predictivo enfocado en rodamientos, se pueden reducir los costos totales operativos, esto a consecuencia de la utilización optimizada de los intervalos de mantenimiento.

4.4. Análisis comparativo

4.4.1. Desarrollo del análisis

Si se tiene presente la investigación preliminar realizada, se puede establecer que el mantenimiento industrial ha evolucionado desde el mantenimiento correctivo, donde fundamentalmente se actúa una vez ya ocurrida la falla, hacia el mantenimiento preventivo, el que se caracteriza por el establecimiento de revisiones periódicas de los activos, llegando finalmente a lo que se conoce como mantenimiento predictivo, el que busca principalmente detectar y anticiparse a futuros fallos de las maquinarias.

Por otra parte, se debe destacar que las empresas oferentes de servicios de mantenimiento muestran dentro de sus propuestas de valor opciones relacionadas al mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo.

Con respecto a esta última, las opciones que se ven en el mercado más bien corresponden a sistemas de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y Mantenimiento Basado en la Condición (CBM).

130 El método justo a tiempo (just in time) (JIT) es un sistema de organización de la producción para las fábricas, de origen japonés. También llamado método Toyota, permite reducir costos, especialmente de inventario de materia prima, partes para el ensamblaje, y de los productos finales.

Cabe mencionar que, si bien efectivamente estas opciones son propias del concepto de mantenimiento predictivo, sus herramientas están más bien relacionadas a métodos estadísticos y el uso de tecnologías para inspecciones en terreno, dando aviso solamente ante inminentes fallas.

Además, si bien dentro de sus propuestas aparece el concepto de Industria 4.0, las herramientas que se ofrecen son más bien puntuales, es decir, se caracterizan por utilizar solamente algunos de los conceptos propios de la Industria 4.0, lo que da a entender desde ya una ventaja diferenciadora de la metodología PHM, pues esta última propone el uso sistemático de variadas herramientas tanto estadísticas como propias de la Industria 4.0, comprendiendo el uso de inteligencia artificial (AI), aprendizaje automático, internet de las cosas (IoT), redes neuronales, ciencia de datos, gemelos digitales, entre otras.

Sin embargo, se debe señalar que el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), como así también el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM), han propiciado las bases para la elaboración de propuestas de valor de la metodología PHM, esto debido a que los conocimientos utilizados por estos métodos representan los precedentes necesarios que sumados a las nuevas herramientas propias de la Industria 4.0 hacen posible la generación de ideas de implementación de la metodología PHM.

Como se pudo comprender en el análisis a la oferta de mantenimiento industrial dentro del mercado nacional, habitualmente las empresas presentan tres conjuntos de servicios que son complementarios entre sí, pero que, desde el punto de vista de modelos de negocios¹³¹, son independientes.

Un ejemplo de lo anterior lo constituye la empresa Fracttal, la que presenta tres productos: Fracttal one, Predictto, y Fracttal X.

Por una parte, Fracttal one se relaciona básicamente a ser un software de mantenimiento del tipo CMMS/GMAO, estos programas están orientados a la toma de decisiones de mantenimiento, a través de una interfaz que puede ser vista por medio de variada tecnología digital e incluso móvil, pudiendo ser integrado a sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP), en donde destaca el software creado por la empresa SAP¹³² siendo uno de los más reconocidos y utilizados en diversas empresas de distintos rubros.

131 El modelo de negocio de una empresa es la estructura que explica cómo, mediante un producto o servicio, una organización crea, entrega y recibe valor en las relaciones con sus clientes, además de explicar cómo se generarán ingresos al completar este proceso.

132 SAP es una empresa multinacional alemana dedicada al diseño de productos informáticos de gestión empresarial, tanto para empresas como para organizaciones y organismos públicos. En términos de ventas, SAP es la mayor compañía de software de Europa y la tercera más grande del mundo.

Desarrollo de la investigación

Por otra parte, Predictto es más bien el algoritmo que sirve para predecir, en particular esta empresa lo relacionada al análisis Weibull el que corresponde a un modelo matemático especial, este modelo contribuye en dos conceptos importantes dentro del mantenimiento predictivo, la degradación y la confiabilidad, el primero ayuda a predecir los comportamientos, mientras que el segundo contribuye en temas de monitoreo de activos.

Finalmente, se tiene Fractal X que corresponde al área de esta empresa enfocada en equipos tecnológicos que sirvan de habilitantes para poder sensorizar, analizar y almacenar los datos obtenidos desde las maquinarias monitoreadas.

Si comparamos lo anteriormente descrito con la metodología PHM, es importante establecer que son variados los elementos que son altamente recomendables de también considerar e incorporar dentro de los probables modelos de negocios que se quisieran llevar a cabo a partir de la implementación de la metodología PHM, por lo tanto, podrían ser sugeribles la aplicación de conceptos administrativos o económicos tales como, por ejemplo, el benchmarking¹³³ para rescatar las buenas prácticas de estas empresas oferentes, así como también considerar los productos sustitutos de la metodología PHM, los que se pueden establecer como aquellos servicios relacionados a mantenimientos correctivos, preventivos o predictivos, esto resulta altamente relevante de considerar, ya que en la minería los programas de mantenimiento preventivos (programados) son muy habituales en sus programaciones de faenas, por lo que, tanto los encargados de operaciones como los de mantenimiento presentes en actividades mineras se encuentran familiarizados con estos tipos de estrategias programadas, por lo tanto, una propuesta fundamentada en la metodología PHM tendría que luchar frente a ese paradigma del mantenimiento, aunque gracias a la incorporación de herramientas tecnológicas a las faenas se han abierto las puertas a planes de mantenimiento predictivo, por lo que estas tecnologías aparecen como los productos complementarios de las metodologías predictivas, tal como se pudo apreciar en la investigación sobre la oferta de mantenimiento industrial, lo que contribuye enormemente a sentar las bases para la incorporación a mediano o largo plazo de las estrategias propias de la metodología PHM.

En el caso de la empresa SHEN reliability engineering (SHEN-RE) ocurre algo similar, su empresa matriz ofrece servicios de ingeniería de mantenimiento para la Industria 4.0, sumado a servicios de monitoreo de condición.

¹³³ El benchmarking es un método de la administración de empresas que busca encontrar las mejores prácticas dentro o fuera de la empresa a través de la comparación de técnicas, procesos o servicios de otras organizaciones con el fin de aumentar la propia eficiencia y competitividad.

Desarrollo de la investigación

La evaluación de criticidad de los activos y la posibilidad de integración a sistemas SCADA son factores que la metodología PHM también debe tener presentes, ya que factores como estos pueden traducirse en mejoras en los planes de mantenimiento, sin embargo, la metodología PHM puede sumar a estos factores el hecho que sus indicadores de falla, caracterizados principalmente por la estimación de la vida útil remanente (RUL), pueden dar avisos mucho más tempranos que las tecnologías de mantenimiento predictivo actuales, por lo que su contribución en disminuir los costos de operación pueden ser aún mucho más sustanciales, además cabe recordar que la metodología PHM pretende entregar información de la salud de los activos en tiempo real, pero además proporcionando información de qué pasará con el activo en el futuro si se continúa utilizando con la misma intensidad de ese momento, lo que es información altamente relevante para la toma de decisiones tanto operacionales como de mantenimiento, contribuyendo de esa manera a la gestión de activos en su conjunto.

SHENPRED, otra unidad de negocios de SHEN-RE, profundiza en el monitoreo de condición, incorporando las inspecciones y los análisis avanzados, ambos conceptos también aportan considerablemente a la potencial implementación de la metodología PHM, esto debido a que las inspecciones, además de contribuir en la detección de posibles fallas, pueden ser una herramienta a considerar para la detección de fallas en los habilitantes de la metodología PHM, es decir, inspeccionar los sensores, sistemas de almacenamiento de datos, entre otros, también es una filosofía que debe estar presente en un modelo de negocios que se quiera llevar a cabo, por otra parte, los análisis avanzados incorporan los conceptos de diagnóstico y pronóstico, fundamentales para conocer tanto la salud de los activos, así como también en la identificación de las causas de deterioros, analizando la causa raíz de estos, es decir, estas características se encuentran presentes en los planes de Mantenimiento Basados en la Condición (CBM) lo que constituye, como se ha mencionado, una base para la implementación de la metodología PHM.

Finalmente, SHENSORS es la empresa que ofrece las tecnologías propiamente tal para llevar a cabo la sensorización, monitoreo de condiciones y la interfaz a través del software MODMA para poder visualizar las condiciones de las maquinarias.

Estos ecosistemas empresariales, de implementación de servicios de monitoreo de condición y de planes de mantenimiento, también pueden arrojar una idea de las potenciales barreras de entrada que debe enfrentar, por ejemplo, una organización que quisiera sumarse al mercado de mantenimiento industrial a través de la metodología PHM, ya que, por ejemplo, las alianzas que estas empresas tienen con proveedores pueden resultar claves a la hora de querer llevar adelante emprendimientos en este sentido, además de los costos asociados a los habilitantes necesarios para poder implementarla.

Otras consideraciones importantes de rescatar, son que resulta recomendable incorporar, por una parte, métricas tales como los KPI a las ofertas basadas en la metodología PHM, pues estos indicadores resultan más familiares a muchas organizaciones, por lo que para demostrar sus potenciales beneficios una posibilidad atractiva es su uso habitual, además, por otra parte, de tener presentes indicadores financieros tales como el ROI, ROA¹³⁴, ROS¹³⁵, CAPEX u OPEX que puedan otorgar características atractivas a los tomadores de decisiones.

Se ha mencionado que dentro de los productos complementarios se encuentran, principalmente, tecnologías tales como sensores, sistemas de análisis de datos y sistemas de almacenamiento de la información. Sin embargo, es importante que las propuestas de valor de la metodología PHM establezcan, como diferenciador respecto a la oferta ya establecida, el hecho de utilizar conocimientos de predicción de eventos, lo que a futuro se espera sea un servicio complementario referente a la optimización del uso de activos, lo que se espera que solamente se pueda alcanzar con el uso sistemático de las herramientas propias de la Industria 4.0 tal como lo propone la metodología PHM.

En la implementación de servicios de mantenimiento industrial, los encargados de los diversos activos juegan un rol relevante, pues son ellos los que finalmente con la información proporcionada por las herramientas tecnológicas deberán tomar decisiones al respecto. Es así como la interfaz en donde se muestren los resultados obtenidos y su fácil comprensión pueden contribuir en esta toma de decisiones, esta información puede eventualmente ser presentada a través de, por ejemplo, un cuadro de mando¹³⁶ que ayude a visualizar de manera resumida la información proporcionada por los sistemas de monitoreo de condición.

Dicho lo anterior, la prestación de servicios de auditoría y/o capacitaciones pueden ser servicios complementarios tanto a la oferta establecida de mantenimiento industrial, como también a las propuestas que nazcan a partir de la metodología PHM.

134 La rentabilidad de los activos (return on assets) (ROA) es un ratio financiero que mide la capacidad de generar ganancias. Esto se logra tomando en cuenta los recursos que son propiedad de la empresa y el beneficio neto obtenido en el último ejercicio.

135 La rentabilidad de ventas (return on sales) (ROS) es un ratio financiero que sirve para cuantificar la eficiencia en el manejo de recursos y sus inversiones mediante la comparación de partidas de balance y de la cuenta de resultados.

136 Un cuadro de mando o dashboard es una herramienta de gestión de la información que monitorea, analiza y muestra de manera visual los indicadores clave de desempeño (KPI), métricas y datos fundamentales para hacer un seguimiento del estado de una empresa, un departamento, una campaña o un proceso específico.

Con respecto a la demanda, si bien como se comentaba, muchos de los activos relacionados a las actividades mineras suelen estar vinculados en su mantenimiento a planes de tipo preventivo (programado), la realidad actual está empujando a las diversas empresas mineras nacionales a la necesidad de adaptarse e incorporar tecnologías propias de la Industria 4.0, potenciado por el hecho de ser un factor clave de eficiencia y competitividad en la industria minera global. Lo anterior, sumado al hecho de que es una realidad el uso de estrategias de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y de Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) en maquinarias mineras, propicia el escenario ideal para la entrada en el mercado de estrategias de mantenimiento basadas en la metodología PHM.

Por otra parte, cabe recordar que el mantenimiento predictivo basa su diferenciación en la aplicación de herramientas o técnicas de detección de distintas variables monitoreadas, que muestran el estado de la maquinaria y pueden anticipar un fallo a través de los indicios que pueden mostrar la vibración, la presión, la temperatura, entre otras variables. Sin embargo, al respecto, se ha mencionado que una ventaja diferenciadora de la metodología PHM es el uso sistemático tanto de herramientas estadísticas como de tecnologías habilitantes para la configuración de sus propuestas de valor. Dado lo anterior, la metodología PHM comprende características diferenciadoras, las que pueden ser disruptivas en el mercado respecto otras propuestas de mantenimiento predictivo, por lo tanto, sus ventajas competitivas¹³⁷ pueden descansar en estrategias de tipo diferenciación, o bien de tipo océano azul¹³⁸, esta última debido al perfil disruptivo que puede tener esta metodología una vez presentada al mercado. Estas diferencias disruptivas se fundamentan en que si bien los monitoreos de condición permiten saber el estado de los equipos en tiempo real, esto solo posibilita tomar medidas ante inminentes fallas, mientras que un monitoreo basado en la metodología PHM proporciona el poder saber el estado actual (diagnóstico), lo que incluye detectar la falla, su ubicación y su criticidad y, al mismo tiempo, su estado futuro (pronóstico), lo que incluye el estudio de los eventos futuros en función de las aplicaciones y modos de uso de los activos, calculando su vida útil remanente (RUL), pero además los intervalos de tiempo en que puede suceder la falla, incorporando el concepto de incertidumbre a sus modelos, dando un nuevo perfil a la toma de decisiones, ya que no solo se trata de actuar frente a una falla o eventual falla, sino también decidir el cómo se actuará o por cuánto tiempo se seguirá haciendo uso del activo de la misma manera que en ese momento.

137. La ventaja competitiva es un concepto desarrollado en el año 1980 por Michael Porter. Se refiere a una característica única y sostenible en el transcurso del tiempo que no posea otra empresa que compita en el mismo mercado. Esta ventaja, al ser única, brinda un posicionamiento favorable.

138 La estrategia del océano azul es la búsqueda simultánea de diferenciación y bajos costos para abrir un nuevo espacio de mercado y crear nueva demanda. Se trata de crear y capturar espacios de mercado no explorados y, de ese modo, hacer de la competencia un factor irrelevante.

4.4.2. Tablas comparativas

4.4.2.1. Políticas de mantenimiento

<i>Características</i>	<i>Correctivo</i>	<i>Preventivo</i>	<i>Predictivo</i>
<i>Corregir defectos o fallas</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Puede ser programado</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Capacidad de anticipación a las fallas</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Establece la criticidad de los activos</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Utilización de métodos estadísticos</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>
<i>Capacidad de predecir la ocurrencia de fallas</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>

Tabla 3: Características de las políticas de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

<i>Características</i>	<i>Correctivo</i>	<i>Preventivo</i>	<i>Predictivo</i>
<i>Similitudes</i>	Puede ser programado Corrige las fallas para optimizar la producción	Puede ser programado Corrige las fallas para optimizar la producción	Puede ser programado Corrige las fallas para optimizar la producción
<i>Diferencias</i>	Corrige las fallas solo cuando se presentan Sustituye la pieza averiada	Implementa medidas destinadas a la prevención de fallas Establece programas de mantenimiento	Analiza las fallas o eventuales fallas para predecir su ocurrencia Contribuye a optimizar los planes de mantenimiento
<i>Relaciones</i>	Proporciona métodos para llevar a cabo las sustituciones de piezas	Proporciona métodos para la programación del mantenimiento	Utiliza algunas de las herramientas de las políticas anteriores

Tabla 4: Comparación de las políticas de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.2. Tipos de mantenimiento predictivo

Características	RCM	CBM	PHM
<i>Concepto de confiabilidad de activos</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Generación de modelos estadísticos</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Condición actual o futura del activo</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Monitoreo de condición</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>
<i>Sistematización de tecnologías habilitantes</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>
<i>Estimación de la vida útil remanente (RUL)</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>

Tabla 5: Características de los tipos de mantenimiento predictivo. Fuente: Elaboración propia.

Características	RCM	CBM	PHM
<i>Similitudes</i>	Uso intensivo de métodos estadísticos Considera el ciclo de vida de los activos	Uso intensivo de métodos estadísticos Considera el ciclo de vida de los activos	Uso intensivo de métodos estadísticos Considera el ciclo de vida de los activos
<i>Diferencias</i>	Se centra en métodos estadísticos	Se centra en el monitoreo de condición	Calcula la estimación de la vida útil remanente (RUL)
<i>Relaciones</i>	Proporciona la base de utilización de métodos estadísticos	Aplicación de métodos estadísticos y algunas tecnologías habilitantes	Modelos de degradación usando de base métodos estadísticos y el monitoreo de condición

Tabla 6: Comparación de los tipos de mantenimiento predictivo. Fuente: Elaboración propia.

4.5. Entrevistas a partes interesadas de la industria minera nacional

4.5.1. Elaboración de las entrevistas

4.5.1.1. Concepto de entrevista

El concepto de entrevista, según la empresa QuestionPro¹³⁹, cuyo enfoque principal consiste en la generación de insights, se define como una técnica de investigación cualitativa que consiste fundamentalmente en hacer preguntas dentro del contexto de una conversación con los encuestados y recopilar datos sobre un tema en particular. El entrevistador, generalmente, tiene conocimientos avanzados sobre el tema a tratar, lo que le permite aproximarse a comprender las opiniones de los encuestados en una serie de preguntas y respuestas claramente planificadas y ejecutadas (QuestionPro, 2022).

Las entrevistas pueden cumplir la misma función que los grupos focales¹⁴⁰ y las encuestas¹⁴¹ cuando se trata de recopilar información del mercado objetivo, pero pueden ser totalmente diferentes en su funcionamiento. Habitualmente, los grupos focales se limitan a pequeños grupos de 6 a 10 personas, mientras que las encuestas son de naturaleza cuantitativa. Las entrevistas deben ser realizadas a una muestra de una población¹⁴², siendo su característica fundamental su tono conversacional. Las entrevistas ofrecen a los investigadores una plataforma para incitar a sus participantes, obteniendo de ese modo la información que se desea recopilar. Existen tres tipos de entrevistas fundamentales en la investigación: estructura, semiestructura, y no estructurada.

4.5.1.2. Tipo de entrevista seleccionada

Dada la revisión de las definiciones para cada tipo de entrevista, se propone el uso, para el desarrollo de la presente investigación, de la entrevista de tipo semiestructurada, debido a que esta ofrece un margen apropiado para sondear a los encuestados, manteniendo una estructura básica de la entrevista, existiendo, en todo momento, la posibilidad de flexibilidad en su realización.

139 QuestionPro es una empresa fundada en el año 2005, con sede en Silicon Valley, California, Estados Unidos. Esta organización se define como un proveedor líder de software para generar insights.

140 El grupo focal, grupo de enfoque o focus group es una técnica cualitativa de estudio de las opiniones o actitudes de un público, utilizada en ciencias sociales y en estudios comerciales.

141 Una encuesta es un instrumento de investigación que contiene una serie de preguntas junto con las posibles respuestas o preguntas abiertas para que el encuestado conteste con sus propias palabras. Los datos se obtienen realizando un conjunto de preguntas normalizadas dirigidas a una muestra representativa.

142 Una muestra estadística es un subconjunto de datos perteneciente a una población de datos. Estadísticamente hablando, debe estar constituida por un cierto número de observaciones que representen adecuadamente el total de los datos.

Dentro de las ventajas de este tipo de entrevista, se encuentra que las preguntas pueden ser preparadas antes de programar la entrevista, dando tiempo para el análisis de las preguntas. Además, como se mencionaba, puede ser flexible, siguiendo al mismo tiempo las directrices de lo que se desea indagar. Por otra parte, el formato propiamente tal en que se expresen las preguntas de estas entrevistas también puede amoldarse según lo requiera el investigador. Finalmente, las entrevistas semiestructuradas pueden recopilar datos cualitativos fidedignos.

Sin embargo, se deben tener ciertas precauciones al momento de llevar a cabo una entrevista semiestructurada, por ejemplo, el rango de flexibilidad de la entrevista debe ser medido de modo de proteger la fiabilidad de los resultados de este tipo de entrevista, por otra parte, también puede resultar complejo la comparación de dos o más respuestas a una misma interrogante, en especial considerando que en este tipo de entrevista no se sigue completamente una pauta rígida para su realización.

4.5.1.3. Propuesta de estructuración de las entrevistas

Ahora, se continúa con la elaboración de una propuesta para la estructuración de las entrevistas a partes interesadas de la industria minera nacional que sean contactados.

Para elaborar la propuesta, se deben considerar y definir varios puntos, los que tendrán una secuencia lógica entre ellos.

Se comienza estableciendo los objetivos generales que se pretenden lograr una vez llevadas a cabo las entrevistas. Una vez definido lo anterior, se define el público objetivo¹⁴³, es decir, las personas, empresas u organizaciones en general que son relevantes para el estudio.

Se debe recalcar que resulta indispensable definir claramente tanto los objetivos generales como así también el público objetivo involucrado, lo primero por ser lo que establece la dirección de las entrevistas y lo segundo por ser la fuente de recopilación de información.

Luego, se debe definir el tamaño de la muestra¹⁴⁴, es decir, el número de entrevistados necesarios para que se produzca representatividad de los resultados.

143 El público objetivo o target representa a los clientes potenciales o público que tienen como objetivo las empresas a la hora de hacerles llegar sus productos o servicios.

144 En estadística, el tamaño de la muestra se define como aquel número determinado de sujetos o cosas que componen la muestra extraída de una población, necesarios para que los datos obtenidos sean representativos de la población.

Desarrollo de la investigación

Sin embargo, recordando las consideraciones iniciales, resulta apropiado mencionar que, análogo a lo que ocurre en una dinámica de grupos focales, el alcance de las entrevistas del presente trabajo de investigación pretende ser un primer acercamiento a la realidad del día a día de las partes interesadas, es decir, los resultados tendrán un carácter mayormente cualitativo, lo que posteriormente podría servir en la elaboración de entrevistas estructuradas o encuestas que sean aplicadas a un número mayor de partes interesadas, cuyos resultados probablemente sean de un carácter mayormente cuantitativo.

Otro punto por considerar es definir el formato de obtención de la información, esto incluye, por una parte, el cómo se registrará la información, lo que puede ser, fundamentalmente, a través de documentos escritos y/o plantillas, pero además se debe contemplar los tipos de medios que pueden ser utilizados para la realización de estas, en este sentido, las entrevistas se pueden realizar personalmente, por vía telefónica o utilizando medios digitales¹⁴⁵.

Posteriormente, se deben definir los principales temas a tratar, esto resulta altamente relevante debido a que estos temas constituirán la base fundamental para estructurar las preguntas que serán parte de cada entrevista. Es importante recordar que, a pesar de la flexibilidad que puede tener, por ejemplo, una entrevista semiestructura como la escogida en el presente trabajo, el foco siempre debe estar en estos temas fundamentales.

Una vez definidos los puntos anteriores, corresponde elaborar las preguntas asociadas a cada tema. Cabe mencionar que cada pregunta se encasillará dentro de alguna de las tres etapas que se proponen: presentación, desarrollo, y cierre.

Para el presente trabajo, la presentación corresponderá a preguntas introductorias, cuyo objetivo fundamental será entender la posición actual del entrevistado en relación con la empresa u organización que represente.

Por otra parte, el desarrollo contemplará las preguntas indagatorias que pretenderán recolectar la información que permita conocer el parecer de las partes interesadas respecto los temas principales que hayan sido establecidos para elaborar las entrevistas.

Posteriormente, en el cierre se pueden incluir preguntas que permitan algún comentario o reflexión sobre las temáticas planteadas, las que pueden potencialmente revelar inquietudes espontáneas que los entrevistados tengan sobre los temas tratados.

145 Los medios digitales son espacios de comunicación que utilizan internet, en los que se produce el intercambio de información o contenido entre los productores de contenidos digitales y los usuarios que consumen o consultan dichos medios.

Desarrollo de la investigación

Una vez ya realizados todos los puntos anteriores, se procede a la búsqueda de las partes interesadas por entrevistar, comunicándose con ellos por los medios que se consideren pertinentes, teniendo presente además la intención de gestionar, coordinar o programar las reuniones para poder llevar a cabo las entrevistas.

Finalmente, una vez lograda la realización de las entrevistas, se pone a disposición la información obtenida para su posterior análisis.

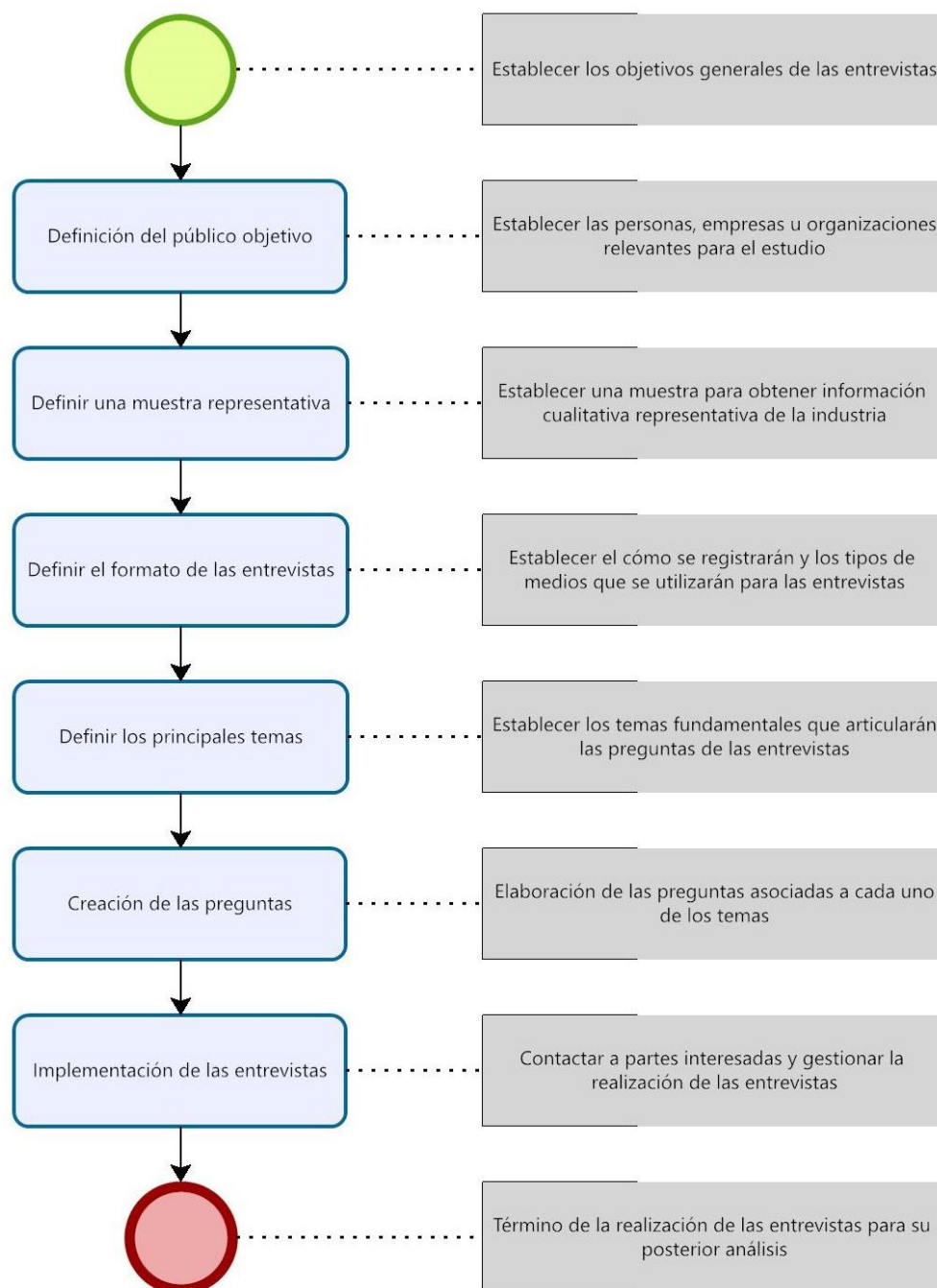


Figura 5: Esquema de la propuesta de estructuración de las entrevistas. Fuente: Elaboración propia.

4.5.1.4. Elaboración de las entrevistas

Considerando lo propuesto anteriormente, se continúa con la determinación de cada uno de los puntos mencionados.

- ***Objetivos***

La realización de las entrevistas busca establecer cuáles son las problemáticas habituales que enfrentan las empresas relacionadas a la industria minera nacional en lo referente a mantenimiento industrial, determinando cuáles son las metodologías y/o políticas utilizadas, así como además los activos que se consideran críticos por su alta relevancia dentro de las operaciones de estas organizaciones, también se pretende indagar en la presencia de los habilitantes para implementar la metodología PHM. Todo lo anterior con la finalidad de visualizar las potenciales temáticas en donde la metodología PHM podría ser de interés dadas sus características y potenciales alcances de su implementación, así como además conocer si se dispone de las herramientas tecnológicas fundamentales para ello.

- ***Público objetivo***

El público objetivo corresponde a partes interesadas del mercado minero nacional, en particular personas que, dados sus conocimientos y experiencia, puedan permitir identificar los activos o actividades que se muestren como críticas dada su relevancia dentro de la cadena de valor de los procesos habituales de las empresas en donde se desempeñan, o bien conocer el contexto industrial en donde puedan estar presentes variados habilitantes para la implementación de la metodología PHM.

- ***Tamaño de la muestra***

Como se ha mencionado, el presente trabajo pretende ser un primer acercamiento a la realidad de las empresas ligadas al sector minero nacional en cuanto mantenimiento industrial se refiere. Bajo esa perspectiva, se considera apropiado un número entre 4 a 10 personas entrevistadas.

- ***Formato de las entrevistas***

Se contempla, al menos en el momento de la realización de las entrevistas, la generación de material escrito que respalde las respuestas de los entrevistados, esta información puede ser posteriormente ordenada en plantillas. Sobre el tipo de canal a utilizar, se consideran tanto la realización de estas de manera personal, como también por vía telefónica o por medios digitales, lo que dependerá principalmente de lo que sea más cómodo para los entrevistados.

Desarrollo de la investigación

- ***Principales temas por tratar***

Sobre este punto, los temas que asoman como más relevantes son:

- Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento.
- Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional.
- Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.

Estos temas buscan determinar cuáles acciones o resultados son los más valorados por la industria minera nacional, así como además identificar los activos que resultan vitales para sus operaciones y el porqué de aquello. Por otra parte, resulta relevante conocer el grado de, por ejemplo, sensorización de los activos, o bien la existencia de herramientas propias de la Industria 4.0, ya que estos factores constituyen parte de los habilitantes para la implementación de la metodología PHM, así como también saber las políticas que rigen la toma de decisiones frente a fallas o eventuales fallas de estas maquinarias.

- ***Elaboración de las preguntas***

En la elaboración propiamente tal de las preguntas, los objetivos y temas a tratar pueden presentarse de manera explícita o implícita. En la propuesta que se muestra en la siguiente tabla, resulta indispensable abordar todos los tópicos de información que se plantean, sin embargo, no es necesario realizar todas las preguntas tipo, esto debido a que lo medular es responder a los tópicos lo que se puede lograr por medio de distintas interrogantes.

<i>Información</i>	<i>Preguntas tipo</i>
1. Comprender la posición actual del entrevistado, su rol y/o funciones dentro de la empresa consultada.	¿Cuál es su cargo? ¿A qué se dedica dentro de su empresa? ¿Cuál es su rol dentro de su organización? ¿cómo describiría o explicaría usted ese rol? ¿Cuál es su grado de relación con la gestión de mantenimiento de los activos de su empresa?

Desarrollo de la investigación

<i>Información</i>	<i>Preguntas tipo</i>
2. Conocer las oportunidades de mejora dentro de la empresa consultada relacionados a mantenimiento industrial.	¿Qué oportunidades de mejora considera usted pueden existir dentro de su empresa relacionados a mantenimiento industrial? ¿Qué tan urgente considera usted implementar mejoras en sus planes de mantenimiento?
3. Caracterizar los activos y/o procesos críticos presentes en las operaciones habituales de la empresa consultada.	¿Qué o cuáles activos y/o procesos usted considera o estima críticos para su empresa? ¿por qué? ¿Qué o cuáles actividades productivas se consideran críticas para su empresa? ¿por qué?
4. Indagar en los habilitantes para implementar la metodología PHM relacionados a datos, si existe procesamiento de estos en tiempo real, sistemas de almacenamiento, sistemas de información, registro de datos contextuales, entre otros.	¿Su empresa cuenta con información en tiempo real del estado de salud de los activos y/o procesos? ¿Su empresa cuenta con sistemas de almacenamiento de datos? ¿Estos sistemas y/o datos se entrecruzan/entrelazan? ¿Su empresa considera el uso de algún tipo de sistema de registro de eventos de falla o similares?
5. Indagar en los habilitantes para implementar la metodología PHM relacionados a sensorización.	¿Qué grado de sensorización tienen, según su opinión, las maquinarias de su empresa? ¿por qué? ¿Qué tipo de sensores utiliza? ¿Conoce usted las variables que son capturadas o recopiladas desde los activos, o bien quién es la persona encargada de saber esos temas?
6. Conocer las estrategias, métodos, políticas, planes o tipos de mantenimiento utilizados por las empresas consultadas.	¿Qué estrategia de mantenimiento es implementada para los activos de su empresa? ¿por qué? ¿Qué política o tipo de mantenimiento es utilizado en sus maquinarias? ¿por qué? ¿Conoce usted la metodología PHM? ¿recomendaría su uso en los planes de mantenimiento de los activos de su empresa?

Desarrollo de la investigación

Información	Preguntas tipo
7. Conocer las políticas y/o procedimientos que son llevados a cabo ante situaciones de falla o eventual falla de las maquinarias, cómo o quiénes toman las decisiones de las acciones a seguir en esos casos.	¿Existen políticas o procedimientos claramente definidos para afrontar situaciones de falla o eventual falla de las maquinarias? ¿Quién o quiénes toman las decisiones de las acciones a seguir? ¿quién o quiénes las ejecutan?
8. Consultar por temáticas generales, inquietudes, dudas o sugerencias respecto lo conversado.	¿Cuáles considera usted que pueden ser otros temas relevantes dentro del contexto del mantenimiento industrial? ¿por qué deberían ser abordados? ¿Qué opinión y/o sugerencias tiene respecto lo conversado?

Tabla 7: Propuesta para la formulación de las entrevistas. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que, por una parte, se debe respetar el orden numérico de los tópicos por abordar en la columna de información, ya que estos tienen una secuencia lógica en la que se intenta que cada tema se conecte con el que prosigue y, por otra parte, también se consideran las etapas mencionadas de cualquier entrevista, siendo el tópico 1 el correspondiente a la presentación, los tópicos del 2 al 7 al desarrollo y, finalmente, el tópico 8 al cierre. Se debe mencionar que, dentro de las preguntas de desarrollo, afín de dar un carácter más práctico a las entrevistas, se consideran 3 subconjuntos, cada uno de los cuales pretende abordar cada uno de los principales temas por tratar.

Principales temas por tratar	Tópicos
1. Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento.	2 y 3
2. Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional.	4 y 5
3. Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.	6 y 7

Tabla 8: Principales temas por tratar y tópicos de las entrevistas. Fuente: Elaboración propia.

Por último, el tiempo de duración de la realización de cada una de las entrevistas pretende estar dentro del rango de 20 a 40 minutos, dependiendo fundamentalmente de la disponibilidad de las personas entrevistadas.

4.5.2. Realización de las entrevistas

Cabe señalar que, con el propósito de sintetizar el contenido de las entrevistas, se hace uso de una metodología sugerida por la Fundación Nacional de Ciencias (NSF)¹⁴⁶, en particular a través del programa Innovation Corps (I-Corps)¹⁴⁷, donde se recomienda el uso de una plantilla en donde se establecen los puntos centrales de las entrevistas que se realicen, con la finalidad de hacer más sencilla su comprensión, así como además las conclusiones que de ellas se rescaten.

Los ítems más relevantes de la plantilla mencionada incluyen los objetivos, las preguntas concretamente realizadas, las lecciones aprendidas de la entrevista, información obtenida (insights), y los próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados durante la realización de la entrevista. La plantilla estándar utilizada para la síntesis de las entrevistas se puede ver en el Anexo 4.

Dicho lo anterior, a continuación, se presentarán las entrevistas a partes interesadas del mercado minero nacional. Esta muestra incluye personas que han participado desde distintos cargos en actividades relacionadas a la minería, en empresas de distintas características y tamaños, siendo algunas directamente partícipes de la actividad minera propiamente tal y otras que proporcionan bienes y/o servicios usualmente utilizados en las faenas mineras y que, dada su relevancia en ellas, pueden contribuir de manera ya sea directa o indirecta en el mejoramiento de los procesos, contribuyendo a la eficiencia de estos y, finalmente, a la competitividad de las empresas ya sea de manera particular o en conjunto con sus socios estratégicos.

146 La Fundación Nacional de Ciencias (National Science Foundation) (NSF) es una agencia gubernamental de los Estados Unidos que impulsa la investigación y educación fundamental en todos los campos no médicos de la ciencia y la ingeniería.

147 El programa Innovation Corps (I-Corps) de la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos es un programa de capacitación empresarial de inmersión que facilita la transformación de la invención en impacto.

• Entrevista #1

La primera entrevista fue realizada a Miguel Arriagada, Jefe de Área Sistemas de Control Avanzado¹⁴⁸ en CODELCO División El Teniente.

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) es una empresa estatal chilena dedicada a la explotación minera del cobre, siendo una de las mayores compañías a nivel mundial en ese rubro. Esta empresa tiene operaciones en ocho centros de trabajo, los que se encuentran ubicados desde la región de Antofagasta hasta la región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Su casa matriz se encuentra en Santiago de Chile.

El Teniente es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta. Está ubicado en la comuna de Machalí, región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua. Comenzó a ser explotado en el año 1905 y ya cuenta con más de 4.500 kilómetros de galerías subterráneas (CODELCO, 2022).

Se rescata de la entrevista como lecciones aprendidas que la introducción de mejoras en los sistemas de mantenimiento, a través de, por ejemplo, modelos predictivos como los de la metodología PHM, pueden resultar también beneficiosos para abordar temas operacionales, esto debido a que se estima que los grandes costos se presentan al arriesgar las maquinarias a usos intensivos que puedan eventualmente llevarlas al colapso, esto debido a que es una práctica habitual dentro del contexto minero poner en riesgo los activos y/o maquinarias con el fin de alcanzar las metas establecidas.

Los sistemas de control avanzado consideran en sus aplicaciones diversas variables que pueden servir también para una posible implementación de la metodología PHM, así como también diversas herramientas tecnológicas que pueden contribuir en el mismo sentido.

El concepto de monitoreo de condición suele estar presente, especialmente relacionado al Mantenimiento Basado en la Condición (CBM).

Por lo tanto, dentro la información obtenida destaca la existencia de habilitantes para posibles incorporaciones de la metodología PHM en las actividades de la industria minera, siendo los sistemas de control avanzado, de cierto modo, un escenario propicio para llevar a cabo estas probables implementaciones.

La plantilla con la descripción punto por punto puede ser revisada en el Anexo 5.

¹⁴⁸ Los sistemas de control avanzado buscan optimizar las operaciones, aumentando el ahorro, disminuyendo los costos y fallas que puedan generarse en los procesos. Permiten que las operaciones funcionen mucho más cerca de los límites operativos, al reducir las variaciones en los procesos.

- ***Entrevista #2***

La segunda entrevista fue realizada a Gustavo Becerra, Supervisor tronadura en Enaex Chile.

Enaex Chile es una empresa líder en servicios integrales de fragmentación de roca. Produce, comercializa, distribuye, y manipula altos explosivos y agentes de voladuras, para minería a cielo abierto y subterránea (Enaex Chile, 2022). En ese sentido, cuenta con una amplia gama de maquinarias especializadas en esos fines, destacando las perforadoras mineras.

Dentro de las lecciones aprendidas a través de la entrevista, se establece la utilización habitual en las faenas mineras de políticas de mantenimiento correctivas, preventivas, y predictivas, siendo las preventivas relacionadas a los mantenimientos programados las mayormente utilizadas, sin embargo, es recurrente que las fechas fijadas para los mantenimientos no sean respetadas, sobrepasando los días que son establecidos previamente, poniendo en riesgo los activos, lo que puede traer grandes consecuencias económicas, especialmente si ocurren fallas catastróficas.

Si bien los diversos activos, en especial las maquinarias modernas, cuentan con información en tiempo real, esta solamente sirve ante inminentes fallas, por lo que una propuesta de valor a partir de la metodología PHM que informe el valor de la vida útil remanente (RUL) de las maquinarias aparece como un tema altamente valorado, sin embargo, es recurrente que los tomadores de decisiones no presten la suficiente atención a potenciar la implementación de este tipo de soluciones.

Es así como dentro de la información obtenida se puede establecer que los mantenimientos preventivos no se realizan de correcta manera, especialmente porque no se respetan las programaciones previas, poniendo en riesgo los activos críticos.

Por otra parte, si bien existe información en tiempo real, esta no sirve para adelantarse con un tiempo suficiente a las fallas, lo que constituye una oportunidad de posicionamiento de la metodología PHM al tener la capacidad de predecir posibles fallas con rangos de tiempo considerables para tomar decisiones de, por ejemplo, la intensidad de uso de los activos.

Finalmente, si bien para el personal de operaciones y/o mantenimiento puede resultar atractivo la implementación de metodologías predictivas, los cargos administrativos no demuestran la suficiente preocupación por estos temas, por lo tanto, es probable que se necesite de un cambio en la cultura organizacional de muchas empresas para poder implementar la metodología PHM en las operaciones habituales de estas compañías.

La plantilla con la descripción punto por punto puede ser revisada en el Anexo 6.

- ***Entrevista #3***

La tercera entrevista fue realizada a Eduardo Grendi, Ingeniero de Investigación y Desarrollo en el Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (AC3E).

El Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Advanced Center for Electrical and Electronic Engineering) (AC3E) de la Universidad Técnica Federico Santa María, es un centro de investigación científica que reúne al mejor talento en Ingeniería Eléctrica y Electrónica del país distribuidos en 6 líneas de investigación y cuyo trabajo espera generar un alto impacto en las áreas de energía y sistemas de potencia, tecnologías para la salud e industria inteligente (AC3E, 2022).

Este centro ha colaborado de manera constante con empresas relacionadas a la actividad minera como, por ejemplo, CODELCO, Anglo American, Enaex, entre otras.

Uno de sus últimos proyectos relacionados a la industria minera ha sido la generación de modelos de degradación para molinos SAG, en donde Eduardo Grendi fue el encargado.

Por lo anterior, dentro de las lecciones aprendidas de la entrevista surge el establecimiento de los molinos SAG como uno de los activos críticos mayormente relevantes en la industria minera nacional, siendo su rol clave en las cadenas de producción, por lo que aparece como altamente valorado la incorporación de modelos predictivos que ayuden al óptimo funcionamiento de este tipo de maquinarias.

Otra importante observación es el hecho de que en los sistemas de mantenimiento resulta clave incorporar la inspección de los mismos sistemas de sensorización que ayudan en la captación de señales desde las maquinarias.

Se debe tener presente que para un mismo activo puede ser necesario la generación de diversos modelos predictivos conforme las aplicaciones y/o modos de uso a los que sea sometido, por lo que un constante desarrollo de estos modelos puede ser una demanda habitual por parte de las empresas partícipes de la industria minera nacional.

Es así como dentro de la información obtenida resulta claro establecer al molino SAG como un activo crítico en el que las empresas del sector minero valoran de manera significativa la incorporación de metodologías que contribuyan a su mantenimiento y la optimización de su uso, evitando paradas no programadas, o bien optimizando los tiempos en los que sea necesario realizar mantenimientos en los que sea imprescindible detener el funcionamiento de la maquinaria.

La plantilla con la descripción punto por punto puede ser revisada en el Anexo 7.

• Entrevista #4

La cuarta entrevista fue realizada a Jonathan Riquelme, Ingeniero de Sistemas de Control Avanzado en Minera Centinela.

Minera Centinela es parte de Antofagasta Minerals¹⁴⁹, el principal grupo minero privado de Chile. Actualmente es el séptimo productor de cobre del país y el décimo quinto a nivel mundial. Minera Centinela está ubicada en la región de Antofagasta, específicamente a 21 kilómetros de la localidad de Sierra Gorda. Además, mantiene un muelle en la localidad de Michilla, pueblo costero perteneciente a la comuna de Mejillones (Minera Centinela, 2022).

Dentro de las lecciones aprendidas en esta entrevista, aparece nuevamente el tema del molino SAG como uno de los principales activos críticos dentro de las faenas mineras, siendo su degradación constantemente monitoreada, considerando además que los procesos de mantenimiento de estos activos son altamente complejos y riesgosos.

Las necesidades de modernización de las compañías mineras han potenciado la inversión en herramientas propias de la Industria 4.0 como, por ejemplo, la incorporación de gemelos digitales, computación de borde, redes neuronales artificiales, entre otros, lo que genera un contexto propicio para que potencialmente se puedan aplicar métodos de mantenimiento a partir de la metodología PHM.

Si bien existe preocupación por utilizar sistemas de almacenamiento de datos históricos del comportamiento de los activos, los datos contextuales por lo general no son respaldados, por lo que quedan solamente como parte de la experiencia de los operadores, por lo tanto, la rotación de personal puede ser un tema de preocupación si se quieren implementar sistemas como los propuestos por la metodología PHM.

Dentro de la información obtenida se rescata que los sistemas de monitoreo de condición son valorados, así como el personal competente, lo que puede implicar la necesidad de capacitaciones. Un tema que preocupa también es el uso ineficiente de las tecnologías propias de la Industria 4.0, debido precisamente a que muchas veces los operadores no cuentan con la formación suficiente, o bien estas tecnologías no son aprovechadas en su máximo potencial, esto podría eventualmente solventarse con la implementación de la metodología PHM haciendo uso de aquellas herramientas tecnológicas.

La plantilla con la descripción punto por punto puede ser revisada en el Anexo 8.

149 Antofagasta Minerals es un grupo minero internacional, con sede en Chile. Es uno de los diez mayores productores de cobre del mundo.

- ***Entrevista #5***

La quinta entrevista fue realizada a Enrique Garcés, Consultor Senior en Pragmaxion.

Pragmaxion es una empresa de consultoría cuyas funciones principales son asesorar, ofrecer apoyo, orientación, y respaldo a otras empresas de diversos rubros, dentro de los que se encuentra el minero, sobre determinados aspectos. Entre sus clientes más destacados del sector minero se encuentran BHP¹⁵⁰, Antofagasta Minerals, y Antamina¹⁵¹.

Dentro de las lecciones aprendidas aparece el hecho de que en múltiples ocasiones la complejidad para llevar a cabo políticas de mantenimiento se relaciona directamente con la coordinación de las áreas involucradas, en este sentido, la incorporación de sistemas de información destinados a tareas propias de mantenimiento puede ser fundamental, lo que sumado a la utilización de metodologías predictivas puede contribuir ostensiblemente en el mejoramiento de las políticas o normas para actuar en casos de fallas o eventuales fallas.

Sobre el grado de conocimiento de la metodología PHM, actualmente es más bien desconocida, sin embargo, una vez comprendidas sus ventajas inmediatamente se transforma en una opción llamativa y que genera expectativas positivas en la industria.

Por otra parte, dentro de la información obtenida se destaca la valoración de los sistemas de gestión del mantenimiento que contribuyan en la toma de decisiones, así como además la incorporación de tecnologías que automaticen funciones.

También se destaca que aparecen como posibles activos demandantes de servicios de mantenimiento predictivo los camiones mineros, molinos SAG, buses de transporte, y las perforadoras mineras.

El conocimiento anticipado de eventos con un rango suficiente de tiempo, como los que puede eventualmente ofrecer la metodología PHM, puede ser un factor clave en las empresas entre los tomadores de decisiones.

La plantilla con la descripción punto por punto puede ser revisada en el Anexo 9.

150 BHP Billiton es una de las compañías mineras más grandes del mundo. Su origen proviene de la fusión de la compañía australiana Broken Hill Proprietary y la compañía británica Billiton.

151 La compañía Minera Antamina es un complejo minero polimetálico que contiene uno de los yacimientos de cobre más importantes del mundo.

• Entrevista #6

La sexta entrevista fue realizada a Francisco Soto, Socio Fundador y Gerente General en Empírica Consultores.

Empírica Consultores es una empresa que se destaca dentro del ámbito geo-minero-metalúrgico con una vasta trayectoria, conocimiento técnico y por el constante proceso de mejora continua (Empírica Consultores, 2022). El modelo de negocio de Empírica Consultores está centrado principalmente en la consultoría metalúrgica especializada, desarrollo de proyectos de ingeniería desde el punto de vista de procesos, así como también en el desarrollo y validación de tecnología innovadora y disruptiva.

Dentro de las lecciones aprendidas, una vez más aparece el molino SAG como protagonista, siendo de hecho uno de los activos principales en variados proyectos de esta empresa. Se destaca también que, en general, el grado de sensorización presente en los diversos activos mineros, según esta empresa, es bastante bueno, sin embargo, a veces existe descuido y falta de mantenimiento de los propios sistemas de captación de señales. Por otra parte, el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) es bastante conocido y utilizado, sin embargo, la metodología PHM resulta desconocida hasta ahora.

En cuanto a la información obtenida, existe un manifiesto interés en soluciones de mantenimiento relacionadas a molinos SAG, estos activos representan uno de los cuales los costos debido a paradas no programadas son de los más altos, no tan solo por la detención de la maquinaria en sí, sino que además porque representa al mismo tiempo la necesidad de detener toda la cadena de producción, lo que evidentemente aumenta el costo de oportunidad¹⁵² de estas paradas no programadas.

A pesar del desconocimiento en general de la metodología PHM propiamente tal, sí se conoce el concepto de vida útil remanente (RUL), lo que ayudaría probablemente en potenciar la imagen de la metodología PHM dentro del contexto minero. Sin embargo, para una probable incorporación total y sistemática de la metodología PHM en las faenas mineras, resulta altamente relevante cuantificar los beneficios, ya que muchos tomadores de decisiones pueden convencerse de invertir en estas tecnologías solamente si existen señales contundentes de sus beneficios en términos financieros.

La plantilla con la descripción punto por punto puede ser revisada en el Anexo 10.

¹⁵² En economía, el costo de oportunidad o costo alternativo designa el costo de la inversión de los recursos disponibles a costa de la mejor inversión alternativa disponible, o también el valor de la mejor opción no realizada.

- ***Entrevista #7***

La séptima entrevista fue realizada a Cristián Ladisla, Socio Fundador y Gerente General en Andes Controls, Power and Automation.

Andes Controls, Power and Automation es una empresa dedicada a entregar soluciones de alto valor agregado en el ámbito de la electrónica de potencia¹⁵³. La idea de fundar Andes Controls, Power and Automation nace a fines del año 2018, al identificar la necesidad de contar con una empresa especialista en electrónica de potencia. En ese momento se determinó que la industria chilena necesitaba un socio comercial con la capacidad de entregar un soporte integral y proponer soluciones de alto valor agregado de manera ágil y confiable. Es así como en el año 2019 se funda Andes Controls, Power and Automation. El plan consistió en consolidar a la empresa en el mercado local para luego poder expandir los negocios al ámbito internacional (Andes Controls, Power and Automation, 2022).

Dentro de las lecciones aprendidas destaca el hecho de que la electrónica de potencia es un tema muy relevante dentro de las actividades mineras, tanto desde el enfoque operacional como de mantenimiento. La relación fundamental de la electrónica de potencia con la minería se produce a través del trabajo en conjunto en, por ejemplo, temas relacionados con grandes motores de alto voltaje.

Para la metodología PHM la captación de señales es altamente relevante, se ha mencionado que para esa tarea los sistemas de sensorización son vitales, sin embargo, los dispositivos denominados rectificadores¹⁵⁴ pueden contribuir en la correcta generación de señales y en el correcto funcionamiento de los activos.

Por otra parte, dentro de la información obtenida, dentro del mundo de la electrónica de potencia existen expectativas positivas frente a las posibles implementaciones de modelos predictivos tales como los que propone la metodología PHM, sin embargo, un tema que preocupa y que puede ser una dificultad en ese sentido puede ser la confidencialidad de los datos históricos que manejan las empresas y que han sido obtenidos desde sus activos.

La plantilla con la descripción punto por punto puede ser revisada en el Anexo 11.

153 La electrónica de potencia es la parte de la electrónica encargada del estudio de dispositivos, circuitos, sistemas, y procedimientos para transformar y controlar voltajes y corrientes de niveles significativos, mediante el procesamiento, control, y conversión de la energía eléctrica.

154 Los rectificadores son dispositivos electrónicos o circuitos que logran transformar la corriente alterna en corriente continua.

- ***Entrevista #8***

La octava y última entrevista fue realizada a Cristian Estay, quien se desempeña en la Dirección de Diseño Eléctrico, TICA¹⁵⁵ y Eficiencia Energética, Vicepresidencia de Proyectos, en CODELCO.

Actualmente, Cristian Estay se encuentra liderando proyectos de minería subterránea relacionados a la División Chuquicamata de CODELCO, la que corresponde a una mina de cobre y oro a rajo abierto. Está ubicada a 15 km al norte de la ciudad de Calama, en la región de Antofagasta, Chile. Es considerada la más grande del mundo en su tipo (CODELCO, 2022).

Dentro las lecciones aprendidas se pueden mencionar que existen oportunidades de implementación de la metodología PHM en otros temas tales como la seguridad de los trabajadores, ya que de manera análoga a como se pueden generar modelos predictivos de mantención de activos, se pueden utilizar herramientas de inteligencia artificial (AI) para modelar el comportamiento de los trabajadores y con ello predecir la ocurrencia o probable ocurrencia de eventos peligrosos para la integridad de las personas.

Otro tema también muy importante por considerar es que es altamente recomendable, antes de pretender generar planes de mantenimiento de los activos, el comprender el negocio minero, entender cómo funciona, por ejemplo, en relación con los precios de los metales, ya que las decisiones de operaciones y/o mantenimiento se toman de acuerdo con el momento económico por el que esté pasando la actividad minera.

En general existen las tecnologías habilitantes necesarias para poder llevar a cabo la metodología PHM, en especial en el caso de CODELCO, ha existido preocupación por potenciar el uso de herramientas relacionadas a la inteligencia artificial (AI), además de existir un claro interés por utilizar algoritmos predictivos en labores no tan solo de mantenimiento de activos, sino que también de seguridad de los trabajadores, particularmente en las actividades mineras subterráneas.

Las políticas cortoplacistas en cuanto el logro de metas de producción perjudica claramente el uso óptimo de los activos, ya que se piensa en los beneficios inmediatos, sacrificando incluso las maquinarias al mediano o largo plazo.

La plantilla con la descripción punto por punto puede ser revisada en el Anexo 12.

155 Son las siglas de tecnologías de la Información, telecomunicaciones y automatización (TICA).

Conclusiones

La minería siendo una de las principales actividades económicas de nuestro país, necesita de metodologías que le permitan implementar sistemas de mejora continua a sus procesos.

El aumento de la complejidad de las faenas, la tendencia mundial por utilizar herramientas propias de la Industria 4.0 para optimizar las operaciones, la creciente competitividad de las empresas integrantes de la industria minera, entre otros factores, hacen que estas organizaciones actualmente tengan que poner especial énfasis a la gestión de activos, especialmente relacionada a la gestión de mantenimiento de sus principales maquinarias.

Si bien el mantenimiento industrial ha sido históricamente parte de las actividades mineras, en la búsqueda por lograr mayor eficiencia quedan obsoletas las políticas de tipo correctivas e incluso las de tipo preventivas (programadas) que han sido por mucho tiempo las mayormente utilizadas por las empresas que forman parte del mercado minero nacional, sumado al hecho de que en variadas ocasiones, como pudo constatarse en las entrevistas a partes interesadas, no se respetan las programaciones, lo que pone en alto riesgo la condición de los activos, arriesgando fallas catastróficas que pueden traducirse en pérdidas financieras altamente considerables.

Por otra parte, si bien los mantenimientos de tipo predictivo comienzan a ser utilizados de manera habitual, estos sistemas carecen actualmente de suministrar a sus clientes intervalos de tiempo suficientes para ejercer cambios en los planes de mantenimiento o tomar decisiones pertinentes con la ayuda de saber con un grado mayor de anticipación los eventos o posibles eventos de falla que a futuro puedan ocurrir a las maquinarias dependiendo de las aplicaciones y/o modos de uso a los que estén siendo sometidas.

En este sentido, la implementación de la metodología PHM puede otorgar al mercado minero nacional herramientas poderosas en cuanto modelos de degradación de activos, generando con ello indicadores de salud (HI), estados de salud (HS), y calculando la vida útil remanente (RUL) de las maquinarias, lo que puede servir de fundamento para establecer ventajas competitivas respecto su competencia debido a las características diferenciadoras e incluso disruptivas dentro de la oferta de mantenimiento industrial a nivel nacional.

Lo anterior, puede significar grandes ahorros debido a que se pueden prevenir sucesos catastróficos de las maquinarias, además de tener la opción de mantener en constante funcionamiento los activos críticos sin mayores sobresaltos, debido a que se contará con información oportuna con un amplio rango de tiempo.

Esto puede significar un cambio de paradigma del monitoreo de condición, así como además del uso de los softwares de mantenimiento, ayudando a mejorar la toma de decisiones y las planificaciones de los mantenimientos de los activos.

A diferencia de sus predecesoras, la metodología PHM hace uso intensivo de las herramientas propias de la Industria 4.0, coordinándolas de ser necesario, caracterizadas fundamentalmente por las tecnologías de inteligencia artificial (AI) que comienzan a posicionarse cada día con mayor fuerza en las diversas industrias y, en particular, en las empresas partícipes del mercado minero nacional.

Los actuales sistemas de control avanzado existentes en las empresas mineras pueden verse potenciados por la metodología PHM, ya que como se pudo indagar, se podría hacer un uso más eficiente de las potencialidades de estas herramientas, lo que constituiría una razón más para atreverse a invertir en ellas.

Es importante tener presente para potenciales propuestas de valor a partir de la metodología PHM, el uso e integración con sistemas de información habitualmente utilizados por las empresas en temas relacionados a mantenimiento como, por ejemplo, los sistemas CMMS/GMAO, así como además hacer uso de los sistemas de monitoreo de condición que ya se encuentran posicionados y son conocidos en el mercado, sin embargo, es relevante recordar que la metodología PHM, a diferencia de lo ofertado hasta hoy en el mercado de mantenimiento industrial, pretende sentar las bases para que en futuro no lejano también se pueda lograr la optimización del uso de los activos a través de la utilización sistemática de las herramientas propias de la Industria 4.0.

En el análisis de la demanda de servicios de mantenimiento industrial relacionada a la industria minera nacional, se pudo constatar que existen ciertos activos habituales que requieren de estas prestaciones como, por ejemplo, las bombas industriales, las correas transportadoras, máquinas rotativas, entre otros, sin embargo, a través de las entrevistas se pudo constatar que uno de los activos principales que aparece como probable demandante de la metodología PHM es el molino SAG, en cuyo caso los modelos de degradación son altamente valorados debido a la gran relevancia de este activo en múltiples cadenas de producción de las empresas mineras, además de la complejidad de realización de procedimientos de mantenimiento de estos activos.

Otro factor clave a considerar es la tendencia al aumento del uso de la electromovilidad, contexto que puede propiciar también variadas oportunidades de implementación de la metodología PHM, en especial en labores relacionadas a actividades mineras subterráneas, en donde la electromovilidad resultará clave para su correcto desarrollo.

Como se mencionó anteriormente, muchas veces en las actividades mineras se pone en riesgo la integridad de las maquinarias debido a la necesidad de cumplimiento de las metas establecidas en las empresas, sin embargo, aquella práctica puede llevar a pérdidas altamente considerables, por esa razón la metodología PHM aparece como una opción que puede contribuir tanto a las operaciones mineras, como así también, naturalmente, a temas de mantenimiento propiamente tal.

El concepto de información en tiempo real también aparece como un tema que no es aprovechado al máximo, en este sentido la metodología PHM al tener la capacidad de proporcionar rangos de tiempo considerables para la toma de decisiones puede dar un valor agregado a este tipo de conceptos.

El hecho que variada maquinaria moderna tenga incorporada tecnología relacionada a inteligencia artificial (AI) puede generar un contexto favorable para implementar la metodología PHM, sin embargo, se debe tener precaución en que también puede ser un factor que involucre nuevos desafíos a esta metodología.

En resumen, son amplias las señales que muestran que la metodología PHM, a pesar de no ser ampliamente conocida todavía, puede tener una excelente llegada en los sistemas de mantenimiento de diversas empresas de la industria minera nacional. Esto gracias a sus características diferenciadoras y disruptivas como se ha mencionado, pero también por el hecho de tener la capacidad de integrarse a las tecnologías que ya comienzan a ser utilizadas sistemáticamente en las operaciones mineras, lo que hace más eficiente su uso, y proporciona mayores razones para que los tomadores de decisiones se atrevan a invertir en la implementación de la metodología PHM, en especial en sus activos críticos.

En general, se ve con optimismo y con buenas expectativas el uso de esta metodología, lo que abre un panorama en el que la metodología PHM puede irrumpir, incluso de manera sistemática, en el mediano o largo plazo en el contexto de la oferta relacionada a mantenimiento industrial 4.0.

Las características de la metodología PHM que contribuyen en la disminución de costos asociados a detenciones no programadas, el mejoramiento de la toma de decisiones relacionadas a temas de mantenimiento, mayor uso del potencial de las herramientas propias de la Industria 4.0, evitar que ocurran fallas catastróficas de los activos críticos, entre otras razones, generan un aumento de la eficiencia de los procesos mineros, lo que puede reflejarse en un incremento de los beneficios financieros, pero aún más importante, traducirse finalmente en un mejoramiento de la competitividad de las empresas partícipes del mercado minero nacional, lo que es un factor clave para mantener a nuestro país como uno de los principales actores de la industria minera a nivel internacional.

Recomendaciones

A partir de las entrevistas realizadas a partes interesadas, surge como una de las recomendaciones principales la necesidad de establecer cuantificaciones de los beneficios de la implementación de la metodología PHM, puesto que esto puede resultar clave para convencer a los tomadores de decisiones de atreverse a invertir en estas nuevas herramientas. Por lo tanto, cuantificar los potenciales beneficios versus las inversiones necesarias es una recomendación altamente relevante.

Por otra parte, claramente el molino SAG es un activo que debe seguir siendo investigado y desarrollado dentro de las propuestas de valor que puedan surgir a partir de la utilización de la metodología PHM, recordando que pueden existir múltiples modelos de degradación de estos activos, dependiendo de las aplicaciones y/o modos de uso, además del grado de sensorización que tengan incorporados o los sensores que deban ser instalados para el correcto monitoreo de señales, así como también de los sistemas de almacenamiento de datos y softwares de mantenimiento utilizados.

Los datos contextuales deben ser enfáticamente incorporados a los posibles modelos que nazcan a partir de la implementación de la metodología PHM, ya que estos datos pueden resultar claves para el mejoramiento de tales modelos, por lo que resulta altamente recomendable que las empresas los valoren y almacenen, tal como ocurre o puede ocurrir con los datos rescatados de los sensores o dispositivos electrónicos.

Otra recomendación importante es investigar la competencia o potencial competencia a nivel internacional, ya que existen variadas empresas a nivel mundial que ofrecen servicios de mantenimiento industrial. Si bien por ahora muchas de estas no están presentes en nuestro país, quizás puedan ser competencia directa en algún momento, recordando que, de hecho, algunas de las empresas estudiadas en el análisis de la oferta de mantenimiento industrial en el mercado nacional tienen sus sedes principales en otros países.

Lo anterior también es relevante debido a que la metodología PHM es de conocimiento universal, por lo tanto, eventualmente podrían surgir variadas empresas que ofrezcan productos o servicios a partir de la metodología PHM, en especial si se produce un escenario en el que esta metodología sea ampliamente aceptada e implementada no tan solo en las actividades mineras, sino que también en otros rubros.

Finalmente, solo enfatizar y recordar que se espera que la metodología PHM en un futuro no tan lejano sea la base para lograr una optimización integral de los activos, contribuyendo no solo en temas de mantenimiento industrial 4.0, sino que además en la optimización de las aplicaciones y/o modos de uso a los que sean sometidas las maquinarias.

Referencias bibliográficas

- AC3E. (2022). Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (AC3E). AC3E. <https://ac3e.usm.cl/>
- Academia Crandi. (2020, 1 julio). ¿Qué son las tecnologías digitales? Academia Crandi. <https://academia.crandi.com/negocios-digitales/que-son-las-tecnologias-digitales/>
- Aggity. (2021, 27 abril). Industria 4.0 para ganar en eficiencia y competitividad. Aggity Spain. <https://aggity.com/industria-4-0-para-ganar-en-eficiencia-y-competitividad/>
- Andes Controls, Power and Automation. (2022). Especialistas en electrónica de potencia al servicio de la industria. Andes CPA. <https://andescpa.com/>
- Baumann, E., Forero, P. A., Selby, G., & Hsu, C. (2021). Methods to Improve the Prognostics of Time-to-Failure Models. *Annual Conference of the PHM Society*, 13(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2021.v13i1.3001>
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación (3.a ed.)*. Pearson Educación.
- Bernal, C. A. (2010). *Proceso de investigación científica. En Metodología de la investigación (3.a ed., pp. 74–231)*. Pearson Educación.
- Calabrese, F., Regattieri, A., Botti, L., & Galizia, F. G. (2019). Prognostic Health Management of Production Systems. New Proposed Approach and Experimental Evidences. *Procedia Manufacturing*, 39, 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.333>
- Carrasco, D., & Pascual, R. (2014). *Determinación de una política de mantenimiento oportunista: análisis en flota de camiones mineros*. https://i3.investigacion.ing.uc.cl/wp-content/uploads/2017/02/JI32015n05_sci05.pdf
- COCHILCO. (2022, 10 junio). *Costo de producción de las empresas de la gran minería del cobre aumentó 8% en 2021*. COCHILCO. <https://www.cochilco.cl/Paginas/Sala-de-Prensa/Noticias.aspx?ID=556>
- CODELCO. (2022). *CODELCO División Chuquicamata*. CODELCO División Chuquicamata. https://www.codelco.com/division-chuquicamata/prontus_codelco/2016-02-25/122529.html
- CODELCO. (2022). *CODELCO División El Teniente*. CODELCO División El Teniente. <https://www.codelco.com/elteniente>
- Cofrigo. (2020, 22 agosto). *Mantenimiento Predictivo Basado en la Condición (CBM)*. Cofrigo. <https://www.cofrigo.com/eficiencia-energetica/mantenimiento-predictivo-basado-en-la-condicion-cbm/>

- Deloitte. (2018, 25 enero). *¿Qué es la Industria 4.0?* Deloitte Spain. <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/manufacturing/articles/que-es-la-industria-4.0.html>
- Eco Mining Concepts. (2019). *Predicción del aumento del consumo específico en molinos SAG*. Eco Mining Concepts. <https://ecominingconcepts.cl/es/prediccion-del-aumento-del-consumo-especifico-en-molinos-sag/>
- ElectroMov. (2019, 11 agosto). *Cómo el ion litio se tomó las tecnologías de baterías para autos eléctricos*. ElectroMov. <https://www.electromov.cl/2019/08/11/como-el-ion-litio-se-tomo-las-tecnologias-de-baterias-para-autos-electricos/>
- Embid, R. (2017, 16 marzo). *Mantenimiento preventivo-predictivo industrial: defectos en rodamientos*. SEAS. <https://www.seas.es/blog/automatizacion/mantenimiento-preventivo-predictivo-industrial-defectos-en-rodamientos/>
- Empírica Consultores. (2022). *Empírica – Especialistas en geometalurgia, mejoramiento operacional de plantas concentradoras y estudios de ingeniería*. Empírica Consultores. <https://empiricaconsultores.cl/>
- Enaex Chile. (2022). *Enaex Chile*. Enaex Chile. <https://www.enaex.com/cl/es/enaex-a-su-lado/>
- Equipo Minero. (2022, marzo). *Las mineras lideran la carga de los vehículos eléctricos a batería*. Equipo Minero. <https://www.equipo-minero.com/contenidos/las-mineras-lideran-la-carga-de-los-vehiculos-electricos-a-bateria/>
- EVTECH. (2022). *Expertos en implementación de sistemas de monitoreo seguro / monitoreo on-line*. EVTECH. <https://evtech.cl/>
- Fortinet. (2022). *¿Qué es la tecnología operativa (TO)?* Fortinet. <https://www.fortinet.com/lat/solutions/industries/scada-industrial-control-systems/what-is-ot-security>
- Fractal. (2022). *Fractal, la plataforma de mantenimiento inteligente*. Fractal. <https://www.fractal.com/es/>
- Guillén, A., Crespo, A., Macchi, M., & Gómez, J. (2016). On the role of Prognostics and Health Management in advanced maintenance systems. *Production Planning & Control*, 27(12), 991–1004. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1171920>
- Hawes, S. (2022, 28 abril). *¿Qué es la gestión del mantenimiento?* SafetyCulture. <https://safetyculture.com/es/temas/gestion-del-mantenimiento/>

- Hu, C., Youn, B. D., & Wang, P. (2019). Case Studies: Prognostics and Health Management (PHM). *Springer Series in Reliability Engineering*, 1, 303–342. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92574-5_9
- Hu, C., Youn, B. D., & Wang, P. (2019). Engineering Design under Uncertainty and Health Prognostics. *Springer Series in Reliability Engineering*, 1. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92574-5>
- IBM. (2022). *¿Qué es deep learning?* IBM. <https://www.ibm.com/cl-es/cloud/deep-learning>
- IBM. (2022). *¿Qué es machine learning?* IBM. <https://www.ibm.com/cl-es/analytics/machine-learning>
- IBM. (2022). *¿Qué es edge computing?* IBM. <https://www.ibm.com/es-es/cloud/what-is-edge-computing>
- IBM. (2022). *¿Qué es la ciberseguridad?* IBM. <https://www.ibm.com/cl-es/topics/cybersecurity>
- IBM. (2022). *¿Qué es un gemelo digital?* IBM. <https://www.ibm.com/cl-es/topics/what-is-a-digital-twin>
- IBM. (2022). *¿Qué es una base de datos en la nube?* IBM. <https://www.ibm.com/cl-es/cloud/learn/what-is-cloud-database>
- KIO Networks. (2022). *¿Qué son los sistemas de información de una empresa?* KIO Networks. <https://www.kionetworks.com/blog/data-center/los-sistemas-de-informacion-de-una-empresa>
- Komatsu. (2022, 13 abril). *Komatsu impulsa alianza para el desarrollo de camiones mineros cero emisiones.* Komatsu. <https://www.komatsulatioamerica.com/chile/komatsu-impulsa-alianza-para-el-desarrollo-de-camiones-mineros-cero-emisiones/>
- MBIT School. (2022, 11 enero). *¿Qué es data science?* MBIT School. <https://www.mbitschool.com/actualidad/que-es-data-science>
- MCK Analytics. (2022). *MCK Analytics.* MCK Analytics. <https://mckanalytics.cl/>
- Mecalux. (2021, 20 julio). *Industria 4.0: así es la cuarta revolución industrial.* Mecalux. <https://www.mecalux.cl/blog/industria-4-0>
- Melo, S. (2020, 22 diciembre). *El futuro del mantenimiento: una guía para la Industria 4.0.* DataScope. <https://datascope.io/es/blog/el-futuro-del-mantenimiento-una-guia-para-la-industria-4-0/>
- Microsoft. (2022). *Procesamiento en tiempo real.* Microsoft. <https://docs.microsoft.com/es-es/azure/architecture/data-guide/big-data/real-time-processing>

- Microsoft. (2022). *¿Qué es la inteligencia artificial?* Microsoft. <https://azure.microsoft.com/es-es/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-artificial-intelligence/>
- Minera Centinela. (2022). *Minera Centinela*. Minera Centinela. <https://web.mineracentinela.cl/>
- Minería Chilena. (2015, 9 diciembre). *Bombas y válvulas: apuntando a un mejor desempeño*. Minería Chilena. <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/bombas-y-valvulas-apuntando-a-un-mejor-desempeno/>
- Minería Chilena. (2015, 5 mayo). *Correas transportadoras: mayor conocimiento y tecnología*. Minería Chilena. <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/correas-transportadoras-mayor-conocimiento-y-tecnologia-2/>
- Minería Chilena. (2010, 23 julio). *Reparación de molino SAG en Escondida*. Minería Chilena. <https://www.mch.cl/reportajes/reparacion-de-molino-sag-en-escondida/>
- Monster Digital Agency. (2022, 10 febrero). *¿Qué son las tecnologías de la información?* Epitech España. <https://www.epitech-it.es/tecnologias-de-la-informacion/>
- Nokia & ABI Research. (2020, 6 mayo). *Nokia and ABI Research identify key trends in manufacturing investment to enable Industry 4.0*. Nokia. <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2020/05/06/nokia-and-abi-research-identify-key-trends-in-manufacturing-investment-to-enable-industry-40/>
- Nueva Minería y Energía. (2019, 6 febrero). *Correas transportadoras: soluciones innovadoras desde la industria minera*. Revista NME. <https://www.nuevamineria.com/revista/correas-transportadoras-soluciones-innovadoras-desde-la-industria-minera/>
- Orchard, M. (2021, 20 abril). *Introduction to PHM: origins and research vision*. Granada Congressos. <https://www.granadacongresos.com/enhance>
- Organización Internacional de Normalización. (2014). *Gestión de activos — Aspectos generales, principios y terminología*. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55000:ed-1:v2:es>
- Portal Minero. (2014, 10 enero). *El valor del mantenimiento en la industria chilena*. Portal Minero. <http://www.portalminero.com/display/NOT/2014/01/10/El+valor+del+mantenimiento+en+la+industria+chilena>
- Portal Minero. (2020, 22 enero). *Ingeniería MCM Chile y el Programa de Innovación en Manufactura Avanzada renuevan su acuerdo de colaboración*. Portal Minero. <https://www.portalminero.com/wp/ingenieria-mcm-chile-y-el-programa-de-innovacion-en-manufactura-avanzada-renuevan-su-acuerdo-de-colaboracion/>

- Predictiva21. (2021, 30 agosto). *¿Varios tipos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)?* Predictiva21. <https://predictiva21.com/rcm-mantenimiento-centrado-confiabilidad/>
- Quant. (2022). *Smart services for a sustainable world*. Quant. <https://www.quantservice.com/es>
- QuestionPro. (2022). *¿Qué es una entrevista estructurada, semiestructurada y no estructurada?* QuestionPro Latinoamérica. <https://www.questionpro.com/blog/es/entrevista-estructurada-y-no-estructurada/>
- Reporte Minero. (2022, 6 mayo). *SQM alcanza flota de vehículos eléctricos más grande de la minería nacional*. Reporte Minero. <https://www.reporteminero.cl/noticia/reportajes/2022/05/sqm-alcanza-flota-vehiculos-electricos-mas-grande-mineria-nacional>
- Revista ElectroIndustria. (2009, noviembre). *Marcos Orchard, Presidente de ACCA y Académico de la Universidad de Chile: “El impacto de la implementación de una estrategia de PHM es directo y en el corto plazo”*. Revista ElectroIndustria - Soluciones tecnológicas para la minería, energía e industria. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1304>
- Rockwell Automation. (2021). *El futuro de la transformación digital en la industria en Europa, Oriente Medio y África*. Rockwell Automation. <https://www.rockwellautomation.com/es-es/company/news/press-releases/company/the-future-of-industrial-digital-transformation-in-emea.html>
- Segarra, B. (2021, 25 febrero). *Diferencias entre el mantenimiento predictivo y el tradicional*. SIGMA Industrial Precision. <https://www.predictive-sigma.com/2021/02/25/diferencias-entre-el-mantenimiento-predictivo-y-el-tradicional/>
- Seguas. (2022, 25 enero). *La importancia del mantenimiento en instalaciones industriales*. Seguas. <https://www.seguas.com/la-importancia-del-mantenimiento-en-instalaciones-industriales/>
- SHEN Reliability Engineering. (2022). *SHEN Reliability Engineering*. SHEN Reliability Engineering. <https://www.shen-re.cl/>
- Siemens. (2020). *Industry 4.0: rising to the challenge*. Siemens Financial Services. <https://new.siemens.com/global/en/products/financing/whitepapers/whitepaper-rising-to-the-challenge.html>
- SIGMA Industrial Precision. (2022). *Máquinas rotativas: aplicaciones industriales*. SIGMA Industrial Precision. <https://www.predictive-sigma.com/aplicaciones-industriales/motores/>
- Tekniker. (2022). *Sistemas ciber-físicos*. Tekniker. <https://www.tekniker.es/es/sistemas-ciber-fisicos>
- TIBCO. (2022). *¿Qué es una red neuronal?* TIBCO Software. <https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-a-neural-network>

- Uribe, I. (2021, 22 noviembre). *¿Qué es el artificial intelligence of things? (AIoT)*. Secmotic. <https://secmotic.com/que-es-el-artificial-intelligence-of-things-aiot/>
- Valuekeep. (2022, 17 enero). *¿Qué es el mantenimiento 4.0?* Valuekeep. <https://valuekeep.com/es/recursos/blog/mantenimiento-4-0/>
- Valuekeep. (2022, 28 julio). *¿Qué es la gestión de activos?* Valuekeep. <https://valuekeep.com/es/recursos/blog/gestion-activos/>
- VARTA. (2019, 15 febrero). *Preventative battery checks – why are they so important?* VARTA. <https://batteryworld.varta-automotive.com/en-be/preventative-battery-checks-why-are-they-so-important>
- Wang, S. (2020, 16 enero). *Fábricas inteligentes e Industria 4.0: la próxima frontera de la industria*. ViewSonic Library. <https://www.viewsonic.com/library/es/negocios/fabricas-inteligentes-e-industria-4-0-la-proxima-frontera-de-la-industria/>

Anexos

Anexo 1: Participación de la minería en el PIB (años 2007-2020)¹⁵⁶.

AÑOS	PIB MINERÍA/PIB NACIONAL (%) ¹	PIB COBRE (%) ¹	PIB RESTO MINERÍA (%) ¹	PRECIO COBRE (B.M.L.) ²
2007	20,5	19,5	1,0	323,2
2008	14,0	12,8	1,2	315,3
2009	13,0	12,0	1,0	234,2
2010	15,9	14,7	1,2	342,0
2011	14,8	13,3	1,6	399,7
2012	12,5	11,1	1,4	360,6
2013	11,0	9,8	1,2	332,1
2014	10,9	9,9	1,0	311,3
2015	8,6	7,8	0,8	249,2
2016	8,1	7,1	1,0	220,6
2017	9,7	8,7	1,0	279,7
2018	9,5	8,5	1,0	295,9
2019	9,1	8,1	1,0	272,1
2020	12,5	11,2	1,3	280,4

Tabla 9: Participación de la minería en el PIB, a precios corrientes (%). Fuente: Banco Central de Chile.

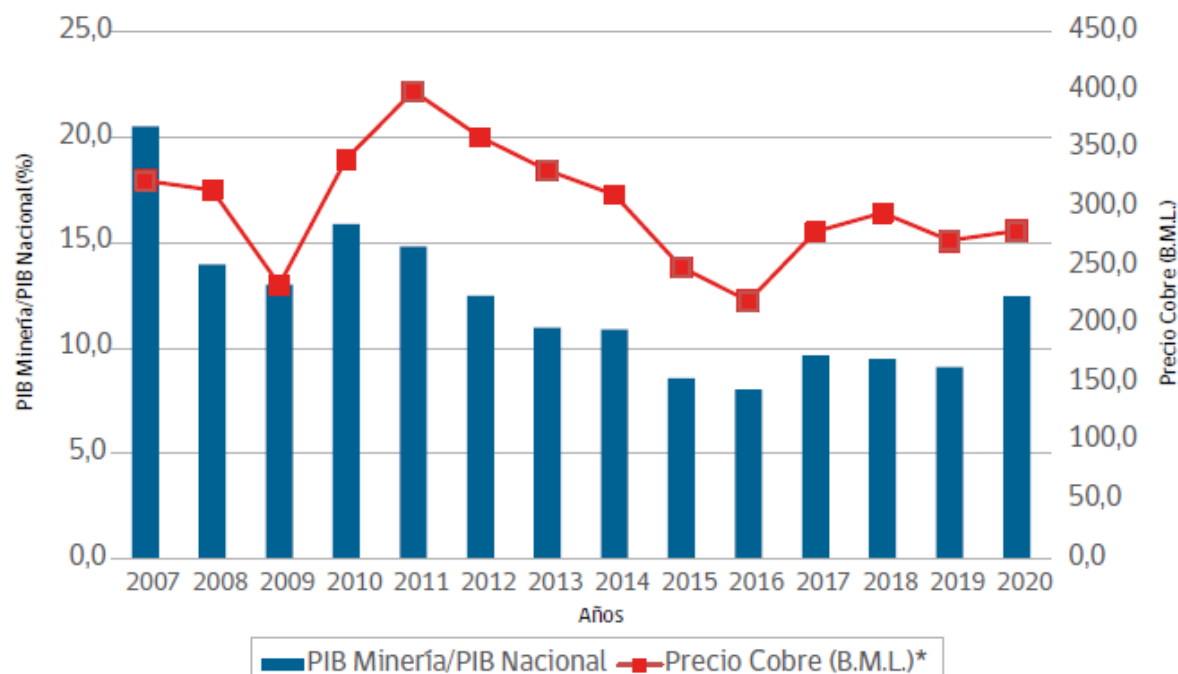


Gráfico 5: Participación de la minería en el PIB y precio del cobre. Fuente: Banco Central de Chile.

156 (1): Banco Central de Chile. (2): Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). Precio del cobre refinado nominal (centavos de dólar por libra). (*): Son las siglas de la Bolsa de Metales de Londres.

Anexo 2: Material investigativo para respaldar propuesta de valor sobre baterías.

- Guha, A. & Patra, A. (2018). Online Estimation of the Electrochemical Impedance Spectrum and Remaining Useful Life of Lithium-Ion Batteries. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(8), 1836-1849. <https://doi.org/10.1109/tim.2018.2809138>
- Guha, A. & Patra, A. (2018). State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Capacity Fade and Internal Resistance Growth Models. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 135-146. <https://doi.org/10.1109/tte.2017.2776558>
- Liu, Z., Sun, G., Bu, S., Han, J., Tang, X. & Pecht, M. (2017). Particle Learning Framework for Estimating the Remaining Useful Life of Lithium-Ion Batteries. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(2), 280-293. <https://doi.org/10.1109/tim.2016.2622838>
- Ma, Y., Chen, Y., Zhou, X. & Chen, H. (2019). Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Battery Based on Gauss–Hermite Particle Filter. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 27(4), 1788-1795. <https://doi.org/10.1109/tcst.2018.2819965>
- Orchard, M. E., Hevia-Koch, P., Zhang, B. & Tang, L. (2013). Risk Measures for Particle-Filtering-Based State-of-Charge Prognosis in Lithium-Ion Batteries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(11), 5260-5269. <https://doi.org/10.1109/tie.2012.2224079>
- Pola, D. A., Navarrete, H. F., Orchard, M. E., Rabie, R. S., Cerda, M. A., Olivares, B. E., Silva, J. F., Espinoza, P. A. & Perez, A. (2015). Particle-Filtering-Based Discharge Time Prognosis for Lithium-Ion Batteries With a Statistical Characterization of Use Profiles. *IEEE Transactions on Reliability*, 64(2), 710-720. <https://doi.org/10.1109/tr.2014.2385069>
- Si, X. S. (2015). An Adaptive Prognostic Approach via Nonlinear Degradation Modeling: Application to Battery Data. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(8), 5082-5096. <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2393840>
- Wang, D., Yang, F., Tsui, K. L., Zhou, Q. & Bae, S. J. (2016). Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Batteries Based on Spherical Cubature Particle Filter. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(6), 1282-1291. <https://doi.org/10.1109/tim.2016.2534258>
- Wei, J., Dong, G. & Chen, Z. (2018). Lyapunov-based state of charge diagnosis and health prognosis for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 397, 352-360. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.024>
- Wei, J., Dong, G. & Chen, Z. (2018). Remaining Useful Life Prediction and State of Health Diagnosis for Lithium-Ion Batteries Using Particle Filter and Support Vector Regression. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7), 5634-5643. <https://doi.org/10.1109/tie.2017.2782224>

Anexo 3: Material investigativo para respaldar propuesta de valor sobre rodamientos.

- Ahmad, W., Khan, S. A. & Kim, J. M. (2018). A Hybrid Prognostics Technique for Rolling Element Bearings Using Adaptive Predictive Models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(2), 1577-1584. <https://doi.org/10.1109/tie.2017.2733487>
- Deutsch, J. & He, D. (2018). Using Deep Learning-Based Approach to Predict Remaining Useful Life of Rotating Components. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 48(1), 11-20. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2017.2697842>
- Elforjani, M., Shanbr, S. & Bechhoefer, E. (2017). Detection of faulty high speed wind turbine bearing using signal intensity estimator technique. *Wind Energy*, 21(1), 53-69. <https://doi.org/10.1002/we.2144>
- Jin, X., Sun, Y., Que, Z., Wang, Y. & Chow, T. W. S. (2016). Anomaly Detection and Fault Prognosis for Bearings. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(9), 2046-2054. <https://doi.org/10.1109/tim.2016.2570398>
- Lei, Y., Li, N., Gontarz, S., Lin, J., Radkowski, S. & Dybala, J. (2016). A Model-Based Method for Remaining Useful Life Prediction of Machinery. *IEEE Transactions on Reliability*, 65(3), 1314-1326. <https://doi.org/10.1109/tr.2016.2570568>
- Malhi, A., Yan, R. & Gao, R. X. (2011). Prognosis of Defect Propagation Based on Recurrent Neural Networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(3), 703-711. <https://doi.org/10.1109/tim.2010.2078296>
- Saidi, L., Ben Ali, J., Bechhoefer, E. & Benbouzid, M. (2017). Wind turbine high-speed shaft bearings health prognosis through a spectral Kurtosis-derived indices and SVR. *Applied Acoustics*, 120, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.005>
- Soualhi, A., Razik, H., Clerc, G. & Doan, D. D. (2014). Prognosis of Bearing Failures Using Hidden Markov Models and the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(6), 2864-2874. <https://doi.org/10.1109/tie.2013.2274415>
- Wang, H., Ma, X. & Zhao, Y. (2019). An improved Wiener process model with adaptive drift and diffusion for online remaining useful life prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 127, 370-387. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.03.019>
- Zhao, F., Chen, J., Guo, L., & Li, X. (2009). Neuro-fuzzy Based Condition Prediction of Bearing Health. *Journal of Vibration and Control*, 15(7), 1079-1091. <https://doi.org/10.1177/1077546309102665>

Anexo 4: Plantilla estándar utilizada para la síntesis de las entrevistas.

Fecha y lugar de la entrevista	15 Septiembre 2022 - MS Teams
Nombre, cargo, empresa	Germán Gandulfo - Memorista Ingeniería Comercial - Universidad Técnica Federico Santa María
Teléfono y/o correo electrónico	Germán Gandulfo <german.gandulfo@sansano.usm.cl>
Asistentes a la entrevista	Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué oportunidades de mejora considera usted pueden existir dentro de su empresa relacionados a mantenimiento industrial? • ¿Su empresa cuenta con información en tiempo real del estado de salud de los activos y/o procesos? • ¿Qué estrategia de mantenimiento es implementada para los activos de su empresa? ¿por qué?
Lecciones aprendidas	• En esta sección se anotan algunas lecciones de lo conversado en la entrevista, lo que se menciona como medular, datos concretos, etc.
Información obtenida (insights)	• En esta sección se anotan algunos puntos que incluyan información relevante para caracterizar a los clientes potenciales (prospectos).
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• En esta sección se anotan los pasos a seguir de manera interna basándose en las lecciones e información obtenida, cómo se deben direccionar las siguientes entrevistas, cómo se debe enfocar lo que se desea averiguar, etc.

Ilustración 5: Plantilla estándar utilizada para la síntesis de las entrevistas. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5: Entrevista #1.

Fecha y lugar de la entrevista	24 Agosto 2022 - Vía telefónica
Nombre, cargo, empresa	Miguel Arriagada - Jefe de Área Sistemas de Control Avanzado - CODELCO División El Teniente
Teléfono y/o correo electrónico	Miguel Arriagada <+56991622838>
Asistentes a la entrevista	Miguel Arriagada y Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué tan urgente considera usted implementar mejoras en sus planes de mantenimiento? • ¿Conoce usted las variables que son capturadas o recopiladas desde los activos, o bien quién es la persona encargada de saber esos temas? • ¿Qué política o tipo de mantenimiento es utilizado en sus maquinarias? ¿por qué?
Lecciones aprendidas	• Introducir mejoras en los sistemas de mantenimiento resulta relevante también para los temas operacionales, ya que los grandes costos se presentan si se arriesga en demasía a los activos para alcanzar las metas establecidas. • Son diversas las variables consideradas en los sistemas de control que pueden ayudar en la implementación de la metodología PHM, así como las herramientas tecnológicas presentes en esas labores. • El monitoreo de condición suele estar presente, relacionado a políticas de mantenimiento basado en la condición (CBM).
Información obtenida (insights)	• Existe la utilización de muchos habilitantes para la incorporación de la metodología PHM en las actividades propias de la industria minera. • Los sistemas de control pueden contribuir en proporcionar el contexto necesario para incorporar la metodología PHM.
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• Indagar sobre la relación de los sistemas de control presentes en la industria minera nacional que puedan contribuir en la implementación de la metodología PHM.

Ilustración 6: Entrevista #1. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6: Entrevista #2.

Fecha y lugar de la entrevista	24 Agosto 2022 - Vía telefónica
Nombre, cargo, empresa	Gustavo Becerra - Supervisor tronadura - Enaex Chile
Teléfono y/o correo electrónico	Gustavo Becerra <+56961248495>
Asistentes a la entrevista	Gustavo Becerra y Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué tan urgente considera usted implementar mejoras en sus planes de mantenimiento? • ¿Su empresa cuenta con información en tiempo real del estado de salud de los activos y/o procesos? • ¿Quién o quiénes toman las decisiones de las acciones a seguir? ¿quién o quiénes las ejecutan?
Lecciones aprendidas	• Existen en la práctica la utilización de políticas de mantenimiento correctivo, preventivo, y predictivo, siendo el preventivo el mayormente utilizado, sin embargo, un problema habitual es que no se respetan las fechas programadas para la mantención preventiva, por lo que constantemente se corre el riesgo de falla de las maquinarias, lo que puede traer grandes consecuencias económicas. • Se cuenta con información en tiempo real, sin embargo, el uso de esta información en planes de mantenimiento predictivo solo dan aviso ante inminentes fallas. • Si bien para el personal de operaciones y/o mantenimiento puede resultar atractivo la implementación de metodologías predictivas, los cargos administrativos no demuestran la suficiente preocupación por estos temas, por lo tanto, es probable que se necesite de un cambio en la cultura organizacional de muchas empresas para poder implementar la metodología PHM en las operaciones habituales de estas compañías.
Información obtenida (insights)	• El mantenimiento preventivo no se ejerce de correcta manera por lo que se expone a fallas catastróficas a los activos críticos. • La información en tiempo real no sirve para adelantarse con suficiente tiempo a las fallas. • Se debe generar un cambio de cultura organizacional para incorporar los conceptos propios de la metodología PHM.
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• Generar el posicionamiento de la idea de que los monitoreos de condición pueden ser utilizados de maneras mucho más ambiciosas. • Preocuparse de la necesidad de generar cambios en la cultura organizacional de las empresas mineras nacionales.

Ilustración 7: Entrevista #2. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7: Entrevista #3.

Fecha y lugar de la entrevista	25 Agosto 2022 - MS Teams
Nombre, cargo, empresa	Eduardo Grendi - Ingeniero de Investigación y Desarrollo - Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (AC3E)
Teléfono y/o correo electrónico	Eduardo Grendi <eduardo.grendi@usm.cl>
Asistentes a la entrevista	Eduardo Grendi y Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué o cuáles activos y/o procesos usted considera o estima críticos para su empresa? ¿por qué? • ¿Qué grado de sensorización tienen, según su opinión, las maquinarias de su empresa? ¿por qué? • ¿Qué estrategia de mantenimiento es implementada para los activos de su empresa? ¿por qué?
Lecciones aprendidas	• El molino SAG aparece como uno de los activos recurrentes que son considerados como críticos en las empresas mineras nacionales. • El grado de sensorización de las maquinarias por lo general es bueno, sin embargo, muchas veces se debe tener precaución en su cuidado, por lo que resulta altamente recomendable incorporar inspecciones a los mismos dispositivos destinados a captar señales para la generación de modelos de degradación. • El mantenimiento predictivo es utilizado, sin embargo, los modelos que existen son para determinadas aplicaciones y modos de uso puntuales, por lo que se requiere aún de mayor desarrollo para enfrentar otras variadas problemáticas.
Información obtenida (insights)	• El molino SAG es un activo crítico para la minería nacional, se debe considerar dentro de las propuestas de valor. • Existe sensorización, pero se pueden generar servicios de asesorías para su uso eficiente. • El mantenimiento predictivo es muy valorado, en especial por las grandes empresas mineras.
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• Generar propuestas de valor para molinos SAG, sin embargo, son muchos sus modos de uso y variables, por lo tanto, se deben detectar las más valoradas. • Considerar agregar las asesorías dentro de los probables modelos de negocios de la metodología PHM.

Ilustración 8: Entrevista #3. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 8: Entrevista #4.

Fecha y lugar de la entrevista	26 Agosto 2022 - Zoom
Nombre, cargo, empresa	Jonathan Riquelme - Ingeniero de Sistemas de Control Avanzado - Minera Centinela
Teléfono y/o correo electrónico	Jonathan Riquelme <+56954199774>
Asistentes a la entrevista	Jonathan Riquelme y Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué o cuáles activos y/o procesos usted considera o estima críticos para su empresa? ¿por qué? • ¿Su empresa cuenta con sistemas de almacenamiento de datos? ¿Estos sistemas y/o datos se entrecruzan/entrelazan? • ¿Existen políticas o procedimientos claramente definidos para afrontar situaciones de falla o eventual falla de las maquinarias?
Lecciones aprendidas	• El molino SAG es uno de los principales activos críticos en las empresas mineras, su degradación es constantemente monitoreada y es altamente complejo realizar las operaciones de mantenimiento dentro de estos equipos. • Las empresas mineras llevan ya un tiempo invirtiendo en herramientas propias de la Industria 4.0, pero no se aprovecha el máximo potencial de ellas. • Existen sistemas de almacenamiento de datos históricos, sin embargo, los datos contextuales solamente quedan como experiencia en los operadores, por lo tanto, la rotación de personal influye en que esa experiencia no pueda ser aprovechada.
Información obtenida (insights)	• Se valora el monitoreo de condición, así como también toda mejora en ese sentido. • Se busca capacitación de personal. • Existen herramientas propias de la Industria 4.0, pero no es aprovechada al máximo a pesar de su uso habitual.
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• Tener presente dentro de los potenciales modelos de negocios de la metodología PHM, servicios de capacitación de estas herramientas. • Generar propuestas de valor que destaquen las cualidades integradoras de la metodología PHM.

Ilustración 9: Entrevista #4. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9: Entrevista #5.

Fecha y lugar de la entrevista	26 Agosto 2022 - MS Teams
Nombre, cargo, empresa	Enrique Garcés - Consultor Senior - Pragmaxion
Teléfono y/o correo electrónico	Enrique Garcés <enrique.garces@edu.sait.ca>
Asistentes a la entrevista	Enrique Garcés y Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué oportunidades de mejora considera usted pueden existir dentro de su empresa relacionados a mantenimiento industrial? • ¿Su empresa considera el uso de algún tipo de sistema de registro de eventos de falla o similares? • ¿Existen políticas o procedimientos claramente definidos para afrontar situaciones de falla o eventual falla de las maquinarias?
Lecciones aprendidas	• La complejidad de llevar a cabo las políticas de mantenimiento tienen que ver directamente con la cantidad de áreas involucradas que tengan relación con los activos considerados críticos, es por eso que la gestión y la coordinación entre los encargados de las distintas áreas resulta altamente relevante para abordar estas temáticas. • Para enfrentar lo anterior, los sistemas informáticos de mantenimiento pueden ayudar en ese propósito. • Las metodologías predictivas pueden contribuir en el mejoramiento de las políticas o normas para actuar en casos de fallas o eventuales fallas.
Información obtenida (insights)	• Valoración de los sistemas de gestión que contribuyan a la optimización de la toma de decisiones. • La incorporación de tecnologías que automaticen ciertas funciones es relevante. • Conocer con anticipación los eventos que sucederán puede mejorar ostensiblemente la organización entre los tomadores de decisiones.
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• Investigar la factibilidad de integrar las herramientas de la metodología PHM en los denominados sistemas CMMS/GMAO utilizados en el mercado nacional, así como también la posible generación de interfaces que ayuden a visualizar los estados de salud (HI) y la vida útil remanente (RUL) de manera confiable y práctica.

Ilustración 10: Entrevista #5. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10: Entrevista #6.

Fecha y lugar de la entrevista	31 Agosto 2022 - MS Teams
Nombre, cargo, empresa	Francisco Soto - Socio Fundador y Gerente General - Empírica Consultores
Teléfono y/o correo electrónico	Francisco Soto <francisco.soto@empiricaconsultores.cl>
Asistentes a la entrevista	Francisco Soto y Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué o cuáles activos y/o procesos usted considera o estima críticos para su empresa? ¿por qué? • ¿Qué grado de sensorización tienen, según su opinión, las maquinarias de su empresa? ¿por qué? • ¿Conoce usted la metodología PHM? ¿recomendaría su uso en los planes de mantenimiento de los activos de su empresa?
Lecciones aprendidas	• El molino SAG se destaca enormemente como protagonista dentro de las cadenas de valor de las empresas mineras nacionales. • El grado de sensorización en general es bastante bueno, sin embargo, a veces hay descuido en mantener estos sistemas en óptimas condiciones. • El mantenimiento basado en la condición (CBM) es conocido y utilizado, sin embargo, la metodología PHM es más bien desconocida.
Información obtenida (insights)	• Existe un claro interés en que aparezcan variadas soluciones de mantenimiento relacionadas a los molinos SAG, debido al costo de las paradas no programadas, o bien por la complejidad en la ejecución de mantenimientos preventivos, por lo que la elaboración de modelos de degradación y predictivos para molinos SAG es muy valorado. • Si bien la metodología PHM no es conocida, el concepto de vida útil remanente (RUL) de los activos críticos es muy valorado. • Los clientes potenciales (prospectos) requieren de cuantificación de los potenciales beneficios de la metodología PHM para atreverse a invertir en ella e implementarla en sus principales activos.
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• Encontrar o pensar en formas de hacer conocida la metodología PHM. • Una de las tareas principales a mediano o largo plazo es cuantificar claramente los beneficios de la aplicación de la metodología PHM, sin embargo, la complejidad de este punto descansa en que se necesita de variados antecedentes concretos de aplicación en activos y/o procesos para tener una cuantificación histórica de los beneficios logrados.

Ilustración 11: Entrevista #6. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11: Entrevista #7.

Fecha y lugar de la entrevista	02 Septiembre 2022 - Vía telefónica
Nombre, cargo, empresa	Cristián Ladisla - Socio Fundador y Gerente General - Andes Controls, Power and Automation
Teléfono y/o correo electrónico	Cristián Ladisla <cristian.ladisla@andescpa.com>
Asistentes a la entrevista	Cristián Ladisla y Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué o cuáles activos y/o procesos usted considera o estima críticos para su empresa? ¿por qué? • ¿Su empresa cuenta con sistemas de almacenamiento de datos? ¿Estos sistemas y/o datos se entrecruzan/entrelazan? • ¿Qué política o tipo de mantenimiento es utilizado en sus maquinarias? ¿por qué?
Lecciones aprendidas	• La electrónica de potencia es un tema muy relevante en muchas actividades relacionadas al ámbito minero, puede tener impacto tanto en las operaciones como en los sistemas de mantenimiento. • Además de los sensores y dispositivos de almacenamiento, los rectificadores pueden jugar un rol importante en la correcta generación de señales y el correcto funcionamiento de los activos. • Los mantenimientos tanto de tipo correctivo, preventivo, y predictivo son vistos y ejecutados en las faenas, sin embargo, el predictivo sigue correspondiendo a más bien avisos ante inminentes fallas.
Información obtenida (insights)	• Fuertes expectativas y valoración en el potenciamiento del uso y mejoras en el concepto de algoritmos predictivos, tanto para eventos en general como así también para evitar fallas de activos críticos. • Existe un alto interés en aplicaciones de la metodología PHM relacionadas a electrónica de potencia. • Garantizar la confidencialidad de los datos obtenidos y almacenados de los activos y/o procesos es un tema que preocupa considerablemente a las empresas del mercado minero nacional.
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• Averiguar sobre investigaciones de la metodología PHM en aplicaciones relacionadas a la electrónica de potencia. • Delimitar claramente las aplicaciones de electrónica de potencia en el contexto de la industria minera nacional.

Ilustración 12: Entrevista #7. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12: Entrevista #8.

Fecha y lugar de la entrevista	30 Septiembre 2022 - Reunión personal
Nombre, cargo, empresa	Cristian Estay – Dirección de Diseño Eléctrico, TICA y Eficiencia Energética – Vicepresidencia de Proyectos - CODELCO
Teléfono y/o correo electrónico	Cristian Estay <cesta002@codelco.cl>
Asistentes a la entrevista	Cristian Estay y Germán Gandulfo
Objetivos, hipótesis contrastada, finalidad	• Caracterizar los activos críticos de la industria minera nacional dada la relevancia de mantener estos en óptimas condiciones de funcionamiento. • Indagar la existencia de habilitantes para la implementación de la metodología PHM en las actividades del sector minero nacional. • Conocer las políticas de mantenimiento industrial del rubro minero nacional para afrontar fallas o eventuales fallas de sus maquinarias.
Preguntas realizadas	• ¿Qué oportunidades de mejora considera usted pueden existir dentro de su empresa relacionados a mantenimiento industrial? • ¿Su empresa cuenta con sistemas de almacenamiento de datos? ¿Estos sistemas y/o datos se entrecruzan/entrelazan? • ¿Qué estrategia de mantenimiento es implementada para los activos de su empresa? ¿por qué?
Lecciones aprendidas	• Existen oportunidades de implementación de la metodología PHM en otros temas tales como la seguridad de los trabajadores, ya que de manera análoga a como se pueden generar modelos predictivos de mantención de activos, se pueden utilizar herramientas de inteligencia artificial (AI) para modelar el comportamiento de los trabajadores y con ello predecir la ocurrencia o probable ocurrencia de eventos peligrosos para la integridad de las personas. • Es altamente recomendable, antes de pretender generar planes de mantenimiento de los activos, el comprender el negocio minero, entender cómo funciona. • En general existen las tecnologías habilitantes necesarias para poder llevar a cabo la metodología PHM, en especial en el caso de CODELCO, ha existido preocupación por potenciar el uso de herramientas relacionadas a la inteligencia artificial (AI).
Información obtenida (insights)	• Se deben incorporar otros temas de potencial aplicación de la metodología PHM, en este sentido, la seguridad de los trabajadores, en especial en trabajos de minería subterránea, resulta un tema altamente importante por considerar. • Es importante comprender el funcionamiento del negocio minero, tanto a nivel nacional como internacional, esto debido a que las decisiones de operaciones y/o mantenimiento se toman de acuerdo con el momento económico por el que esté pasando la actividad minera. • Las políticas cortoplacistas en cuanto el logro de metas de producción perjudica claramente el uso óptimo de los activos, ya que se piensa en los beneficios inmediatos, sacrificando incluso las maquinarias al mediano o largo plazo.
Próximos pasos a seguir como resultado de los conocimientos adquiridos o revelados	• Establecer claramente la relevancia de incorporar otras perspectivas de aplicación de la metodología PHM, en especial en temas de seguridad de los trabajadores en sus actividades habituales dentro de las faenas mineras.

Ilustración 13: Entrevista #8. Fuente: Elaboración propia.