



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Integración de Industria 4.0 en mejora de planes de
mantenimiento predictivo para flota de carguío en una
mina de tajo abierto**

Tesis para optar el Título de
Ingeniera Mecánico - Eléctrica

Yesenia Milagritos Morales Mendro

Asesor(es):
Mgtr. Ing. Juan Junior Valdiviezo Espinoza

Piura, enero de 2024

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Yesenia Milagritos Morales Mendro, egresado del Programa Académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 47209404.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
"Integración de Industria 4.0 en mejora de planes de mantenimiento predictivo para flota de carguío en una mina de tajo abierto"
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis¹ para optar el Título profesional² de Ingeniería Mecánico - Eléctrica.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - Juan Junior Valdiviezo Espinoza, identificado con DNI N° 47107212
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 08/12/2023.



Firma del autor-oporante³

¹Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.
²Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.
³Indicar el DNI, no el número digital, salvo certificado.

Dedicatoria

A Dios, fuente de sabiduría y guía constante en mi vida. En Él he encontrado la fortaleza para superar desafíos, la paciencia para perseverar en momentos difíciles y la inspiración para emprender este camino académico. Agradezco Su gracia y amor incondicional que han sido mi sustento durante cada etapa de esta travesía.

A mi madre, cuyo amor y apoyo han sido un reflejo del cuidado divino en mi vida. Su sacrificio y valores han sido mi mayor ejemplo.

A mi asesor de tesis, Juan Junior Valdiviezo Espinoza, por su orientación experta, su paciencia y su compromiso constante con la excelencia académica. Su guía ha sido esencial para la realización de este trabajo.

Esta tesis está dedicada a todos aquellos profesionales del mantenimiento que buscan la excelencia a través de la innovación. Que este trabajo contribuya modestamente al avance del mantenimiento 4.0 y al desarrollo de soluciones que optimicen la gestión de activos en el contexto industrial.



Resumen

La tesis "Integración de Industria 4.0 en mejora de planes de mantenimiento predictivo para flota de carguío en una mina de tajo abierto" surge como respuesta a la creciente necesidad de las empresas mineras de optimizar costos y maximizar la eficiencia en un contexto de desarrollo de la revolución industrial. En este marco, se observa una búsqueda constante por mejorar la gestión de activos y mantenimiento para garantizar la continuidad de la producción con altos niveles de rendimiento. El proyecto se enfoca en integrar la tecnología de la Industria 4.0 para potenciar los planes de mantenimiento predictivo en la flota de carguío de una mina de tajo abierto.

Los objetivos específicos se centran en analizar la aplicación y beneficios de la tecnología Industria 4.0 en cada etapa de la ingeniería de mantenimiento, desarrollar un plan de mantenimiento predictivo específico para la flota de carguío, realizar un análisis costo-beneficio de la aplicación de la tecnología en la gestión de mantenimiento y optimizar los tiempos de atención en mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos de carguío.

La metodología empleada involucra una exhaustiva revisión de fuentes primarias, incluyendo tesis de grado, maestrías, doctorados, artículos, revistas, libros e informes de congresos relacionados con la transformación digital y la Industria 4.0. Esta revisión permitió identificar soluciones adaptables a los procesos del mantenimiento. Posteriormente, se definió una variedad de tipos, metodologías y estrategias de mantenimiento aplicables a la gestión de activos en la ingeniería de mantenimiento. Se estableció una "trazabilidad" de aplicación de las herramientas de tecnología Industria 4.0 en los procesos de mantenimiento con mayor impacto en la gestión, planificación y ejecución del mantenimiento de los equipos de carguío. Como resultado del análisis, se propone de manera estructurada la integración de herramientas clave de la Industria 4.0, como *IoT*, *Big Data*, *Cloud Computing*, realidad aumentada y virtual. Estas herramientas se presentan como soluciones adoptables para mejorar la performance de la gestión de activos y mantenimiento en la flota de carguío de una empresa minera. La propuesta busca no solo optimizar costos y aumentar la rentabilidad, contribuyendo así a la sostenibilidad y eficiencia a largo plazo en el sector minero.

En conclusión, la tesis representa una contribución significativa al campo de la ingeniería mecánica eléctrica al abordar de manera integral la integración de la Industria 4.0 en los planes de mantenimiento predictivo en el contexto específico de una mina de tajo abierto. La aplicación de estas tecnologías emergentes se presenta como un paso crucial hacia la modernización y mejora continua de las operaciones mineras, alineándose con las demandas de la era industrial actual.

Tabla de contenido

Introducción.....	12
Capítulo 1: El Mantenimiento Industrial y tecnología Industria 4.0	14
1.1. Mantenimiento Industrial	14
1.2. Evolución del mantenimiento industrial	14
1.3. Tipos de mantenimiento industrial	15
1.3.1. Mantenimiento correctivo.....	15
1.3.2. Mantenimiento preventivo - PM	17
1.3.3. Mantenimiento predictivo - PdM	18
1.3.4. Mantenimiento Proactivo.....	21
1.3.5. Mantenimiento Prescriptivo (RxM)	23
1.4. Ingeniería y Planificación de Mantenimiento.....	25
1.4.1. Estrategias para optimización de mantenimiento industrial	25
1.4.2. Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM	27
1.4.3. Mantenimiento Productivo Total (TPM).....	30
1.4.4. Indicadores de Mantenimiento Industrial y ACR.....	33
1.4.5. Mantenimiento basado en condición (MBC).....	37
1.5. Planificación de mantenimiento.....	37
1.5.1. Sistema Enterprise Resource Planning (ERP) para gestión de mantenimiento ...	40
1.5.2. Optimización de planes de mantenimiento preventivo PMO	42
1.6. Tecnología de la Industria 4.0.....	44
1.7. Estado del Arte	46
1.8. Desarrollo histórico de la Industria 4.0	50
1.9. Herramientas que comprenden la Industria 4.0	51
1.9.1 Big Bata	52
1.9.2 Internet de las cosas (IoT).....	54
1.9.3 Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL)	55
1.9.4 Base de datos en la Nube – Cloud Computing	58
1.9.5 Realidad Virtual y Aumentada (RVA).....	60
1.9.6 Robótica colaborativa	61

Capítulo 2: Planes de mantenimiento para equipos de carguío con Industria 4.0.....	63
2.1. Aplicación de Industria 4.0 en Mantenimiento	63
2.1.1 Ciclo de la gestión de mantenimiento tradicional en equipos de carguío	67
2.1.2 Contexto operacional de gestión de mantenimiento en equipos de carguío	67
2.1.3. Arquitectura tecnológica industria 4.0 para el nuevo modelo de Mantenimiento para equipos de carguío	71
2.2. Herramientas de industria 4.0 a adoptar para planes de mantenimiento	72
2.2.1. Monitoreo de condición con internet de las cosas IoT a Palas y Cargadores	72
2.2.2. ERP – SAP con Cloud Computing	77
2.2.3. Análisis de fallas con Machine Learning	82
2.2.4. Diagnóstico de falla con realidad virtual y aumentada	86
2.2.5. Mantenimiento predictivo-prescriptivo con Big Data	90
2.3. Recopilación datos de campo de equipos de carguío	94
2.4. Procesamiento de datos y emisión de información	98
2.5. Planes de mantenimiento por frecuencia y condición	102
2.6. Flujo de planeamiento con herramientas industria 4.0	104
2.6.1. Análisis costo-beneficio con nuevo modelo de gestión de mantenimiento 4.0	106
2.6.2. Optimización de tiempos de atención a equipos de carguío	108
Conclusiones.....	110
Recomendaciones	111
Referencias.....	112

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Preparación de transformación digital en Latinoamérica</i>	46
Tabla 2. <i>Ranking mundial de digitalización al 2022</i>	48
Tabla 3. <i>Roles y funciones de las principales áreas de mantenimiento</i>	64
Tabla 4. <i>Equipos de la flota de carguío</i>	68
Tabla 5. <i>Principales KPI de la gestión de mantenimiento en una mina de tajo abierto</i>	68
Tabla 6. <i>Costos en pérdida por hora de cada equipo de carguío inoperativo</i>	71
Tabla 7. <i>Arquitectura "tecnológica" tradicional de gestión de mantenimiento de equipos de la flota de carguío</i>	71
Tabla 8. <i>Diferencia entre un mantenimiento tradicional y un mantenimiento con Industria 4.0</i>	77
Tabla 9. <i>Mantenimiento tradicional y Mantenimiento con Industria 4.0</i>	81
Tabla 10. <i>Diferencia entre un ACR tradicional y un ACR con Machine Learning</i>	85
Tabla 11. <i>Mantenimiento tradicional versus Mantenimiento 4.0- Soporte con RVA</i>	90
Tabla 12. <i>Mantenimiento tradicional vs Mantenimiento 4.0- Big Data predictivo- prescriptivo</i>	93
Tabla 13. <i>Parámetros para la recopilación de datos</i>	94
Tabla 14. <i>Gestión de mantenimiento utilizado Industria. 4.0</i>	99
Tabla 15. <i>Costos por mantenimiento correctivo no programado</i>	107
Tabla 16. <i>Resultados de pérdidas de producción por inoperatividad de flota de carguío 2022</i>	107

Lista de figuras

Figura 1. <i>Línea de tiempo del mantenimiento industrial hasta el 2020</i>	15
Figura 2. <i>Modelo de mantenimiento correctivo</i>	16
Figura 3. <i>Estructura de disposición de tiempo para los tipos de mantenimiento</i>	16
Figura 4. <i>Ventajas y desventajas del mantenimiento reactivo</i>	17
Figura 5. <i>Características de una orden de trabajo estándar</i>	18
Figura 6. <i>Tecnologías de mantenimiento predictivo</i>	20
Figura 7. <i>Proyección mantenimiento predictivo en los próximos 5 años</i>	20
Figura 8. <i>Módulo o procesos de mantenimiento predictivo</i>	21
Figura 9. <i>Costos versus frecuencia de mantenimiento</i>	21
Figura 10. <i>Disponibilidad y rendimiento de activos</i>	22
Figura 11. <i>Lógica del mantenimiento prescriptivo</i>	24
Figura 12. <i>Curva P-F y el tipo de atención en las etapas de falla</i>	24
Figura 13. <i>Diagrama de costos asociado a mantenimiento</i>	25
Figura 14. <i>Categorías de mantenimiento bajo estándar ISO 14224-2016</i>	26
Figura 15. <i>Tipos de Mantenimiento según la norma EN 13306:2017</i>	26
Figura 16. <i>Relación Costo-Beneficio versus Dificultad de implementación</i>	27
Figura 17. <i>Beneficios del RCM</i>	28
Figura 18. <i>Esquema de toma de decisión aplicado al RCM</i>	29
Figura 19. <i>12 etapas del TPM</i>	32
Figura 20. <i>Los 8 pilares del TPM</i>	33
Figura 21. <i>Indicadores de mantenimiento industrial</i>	34
Figura 22. <i>Indicadores más utilizados en mantenimiento</i>	35
Figura 23. <i>Procesos para realizar ACR</i>	36
Figura 24. <i>Secuencia para un ACR con la metodología de Árbol Lógico</i>	36
Figura 25. <i>Alcances de la planificación de mantenimiento</i>	37
Figura 26. <i>Preguntas para el planner de mantenimiento</i>	38
Figura 27. <i>Secuencia para elaborar un plan de mantenimiento</i>	39
Figura 28. <i>Metodología PDCA y SAP PM</i>	42

Figura 29. <i>Diferencias entre el PMO y RCM</i>	43
Figura 30. <i>Enfoque de siete pasos AMEF</i>	44
Figura 31. <i>Tecnología industria 4.0</i>	45
Figura 32. <i>Tendencia del Mantenimiento a Industria 5.0</i>	47
Figura 33. <i>Gestión de mantenimiento hacia la robotización o inteligencia artificial</i>	48
Figura 34. <i>Tendencia a la digitalización de Latinoamérica del 2013-2022</i>	49
Figura 35. <i>Aplicación de brazos robots en cambio de liners en molinos</i>	49
Figura 36. <i>Línea de tiempo de la evolución industrial</i>	50
Figura 37. <i>Línea de tiempo hacia la cuarta revolución industrial</i>	51
Figura 38. <i>Ciclo de datos en Big Data</i>	53
Figura 39. <i>Diferenciación de utilización de datos en forma manual y Big Data</i>	54
Figura 40. <i>Big Data y el marco de análisis de falla</i>	54
Figura 41. <i>Comparación red neuronal simple y deep learning</i>	56
Figura 42. <i>Curva P-F con Machine Learning</i>	57
Figura 43. <i>Estructura y secuencia de procesamiento de información por ML</i>	58
Figura 44. <i>Desarrollo de herramientas computacionales en la nube</i>	59
Figura 45. <i>Herramientas o medios de interacción con la RV y RA</i>	60
Figura 46. <i>Utilidades de la Realidad Virtual y Realidad Aumentada</i>	61
Figura 47. <i>Ecosistema de Industria 4.0</i>	62
Figura 48. <i>Áreas de mantenimiento</i>	63
Figura 49. <i>Gestión de Mantenimiento con Industria 4.0</i>	65
Figura 50. <i>Herramientas de la industria 4.0 y el Mantenimiento 4.0</i>	66
Figura 51. <i>Modelo de Mantenimiento con industria 4.0</i>	66
Figura 52. <i>Flujograma de Gestión de mantenimiento</i>	67
Figura 53. <i>Disponibilidad real, budget y planificada del año 2022- Mina de tajo abierto</i>	69
Figura 54. <i>Detenciones de la flota de los equipos de Carguío 2022</i>	69
Figura 55. <i>Costos de mantenimiento correctivo del año 2022</i>	70
Figura 56. <i>Costos de mantenimiento correctivo no programado en el año 2022</i>	70
Figura 57. <i>Propuesta de arquitectura para la gestión de mantenimiento</i>	72
Figura 58. <i>Vistas de una Pala utilizada en gran minería para el carguío</i>	73

Figura 59. <i>Nomenclatura de pala eléctrica CAT 7495, originalmente BUCYRUS 495HR</i>	73
Figura 60. <i>Principales sistemas de una pala eléctrica de cables, serie CAT 7495</i>	74
Figura 61. <i>Principales sistemas del cargador Komatsu de serie LT 2350</i>	74
Figura 62. <i>Sistema de propulsión y mandos de accionamiento de una pala CAT 7495</i>	75
Figura 63. <i>Ejemplo de sensorización en detalle de un sistema electromecánico</i>	76
Figura 64. <i>Flujograma del proceso de programación</i>	78
Figura 65. <i>Flujograma del proceso de planificación</i>	79
Figura 66. <i>Flujograma del proceso de la demanda de trabajos correctivos</i>	80
Figura 67. <i>Aplicativo PCM para mejorar la gestión de mantenimiento.</i>	81
Figura 68. <i>Árbol lógico para un ACR</i>	83
Figura 69. <i>Ejemplo de ACR en equipos de carguío</i>	83
Figura 70. <i>ACR con Machine Learning</i>	84
Figura 71. <i>Lógica de tratamiento de modos de falla con AMEF</i>	84
Figura 72. <i>Flujo de algoritmo para aplicar Machine Learning en Palas y Cargadores</i>	85
Figura 73. <i>Reporte de seguimiento de condiciones de LT2350</i>	87
Figura 74. <i>Eventos de máquina y operación, códigos eléctricos</i>	88
Figura 75. <i>Ejemplo de una recomendación para un modo de falla</i>	88
Figura 76. <i>Eventos de los modos de falla</i>	91
Figura 77. <i>Relación de valor y complejidad respecto a mantenimiento</i>	92
Figura 78. <i>Análisis de información para Mantenimiento con herramientas de la industria 4.0</i>	92
Figura 79. <i>Flujo de datos de con Big Data y Machine learning</i>	93
Figura 80. <i>Geolocalización de equipos en mina de tajo abierto</i>	95
Figura 81. <i>Registro de señales para equipos CAT- DARIS</i>	95
Figura 82. <i>Sistema de monitoreo de los Dealer o fabricantes</i>	96
Figura 83. <i>Sistema de monitoreo Daris</i>	96
Figura 84. <i>Kontrax sistema de monitoreo para equipos Komatsu</i>	97
Figura 85. <i>Integración de recopilación de datos e información de equipos de carguío</i>	98
Figura 86. <i>Herramientas de la industria 4.0 para equipos de carguío</i>	101
Figura 87. <i>Planes de mantenimiento por frecuencia y condición</i>	103

Figura 88. <i>Planeamiento tradicional</i>	105
Figura 89. <i>Planeamiento con industria 4.0 para requerimiento de desempeño de equipos</i> .	105
Figura 90. <i>Interacción de normas de gestión de mantenimiento para industria 4.0</i>	106
Figura 91. <i>Detenciones correctivas no programadas de la flota de carguío 2022</i>	106



Introducción

Bajo un enfoque global y de acuerdo con Arredondo (2023), la búsqueda de todas las empresas por ser más competitivas y rentables genera cambios en sus procesos. Estos cambios buscan maximizar la eficiencia, encontrar diferenciación y superar a la competencia. Una de las estrategias de mayor impacto es la adquisición, implementación y desarrollo de tecnologías digitales en todos los procesos productivos, lo que impulsa transformaciones en la cultura y el pensamiento de sus colaboradores, así como en las estrategias y estructuras organizativas. Estos avances tecnológicos en las empresas se enmarcan en lo que se conoce como Transformación Digital, que incluye la implementación de herramientas de la tecnología de la Industria 4.0. Esta transformación beneficia a toda la organización, al capital humano, a los grupos de interés y al medio ambiente.

Para la gestión de activos físicos y el mantenimiento industrial, es fundamental buscar constantemente mejorar el rendimiento de los equipos de una planta industrial. Para lograrlo, es de suma importancia implementar una innovación inteligente basada en la recopilación y la transferencia de información entre los equipos. La conectividad debe ser desde y hacia la planta. Esta innovación debe abarcar todo el proceso evolutivo de los equipos, combinando las capacidades analíticas de las herramientas informáticas con los datos disponibles, lo que permitirá convertir cada equipo en un dispositivo inteligente (Val Roman, 2018).

En Perú, diversas compañías mineras que operan a cielo abierto conforman la industria de la minería a gran escala para la elaboración de concentrado de cobre. Como parte de sus iniciativas de innovación, centran sus esfuerzos en la digitalización con el propósito de establecer un entorno de producción más avanzado.

En la industria minera, se presenta una oportunidad evidente y realista para la innovación tecnológica mediante la adopción de la transformación digital y la tecnología asociada con la Industria 4.0. Es posible incorporar maquinaria y equipos inteligentes mediante la integración de dispositivos electrónicos, software especializado y conectividad en el ámbito de Internet. Esta conectividad facilita la comunicación entre las máquinas y la interacción con los seres humanos. La aplicación informática les posibilita la autogestión y la toma descentralizada de decisiones.

Las máquinas dotadas de sensores recopilan datos e información acerca de su propio funcionamiento, el entorno que las rodea y su estado operativo. Estos datos e información pueden ser compartidos con los fabricantes o con aquellos encargados de gestionar y supervisar su operatividad. Gracias a su habilidad de autogestión, los operadores apenas perciben la presencia de los productos y máquinas inteligentes, solo siendo necesario que estén atentos cuando se debe llevar a cabo mantenimiento.

Los servicios inteligentes son innovadores y contribuyen a la creación de nuevos modelos de negocio. Los modelos analíticos aplicados a los datos (*Big Data*) facilitan la

automatización en la toma de decisiones, por ejemplo, permiten predecir y/o prescribir el momento en el que un equipo o máquina requerirá mantenimiento. Esto a su vez permite a los diseñadores y fabricantes aumentar el valor del sistema productivo, al crear equipos o máquinas inteligentes de manera más eficiente (Val Roman, 2018).



Capítulo 1

El mantenimiento industrial y tecnología Industria 4.0

1.1. Mantenimiento industrial

Los activos y/o equipos son considerados como el núcleo central de las instalaciones fabriles modernas, el desempeño saludable y óptimo, así como su atención de mantenimiento necesitan la adopción o integración de soluciones tecnológicas para hacer un mantenimiento inteligente (Peñata, Bolaños, Chimbi, 2021).

1.2. Evolución del mantenimiento industrial

González (2021) menciona que: La evolución del mantenimiento industrial ha quedado registrada en la literatura desde aproximadamente 1780. Sin embargo, su mayor avance se produjo entre la segunda y la tercera revolución industrial, cuando se empezaron a describir técnicamente las actividades de mantenimiento en equipos. La concepción inicial de la mayoría de los sistemas de gestión de mantenimiento surgió con el objetivo de asegurar la continuidad y operativa de maquinarias y equipos, junto con la preservación de la calidad y la eficiencia de los procesos productivos.

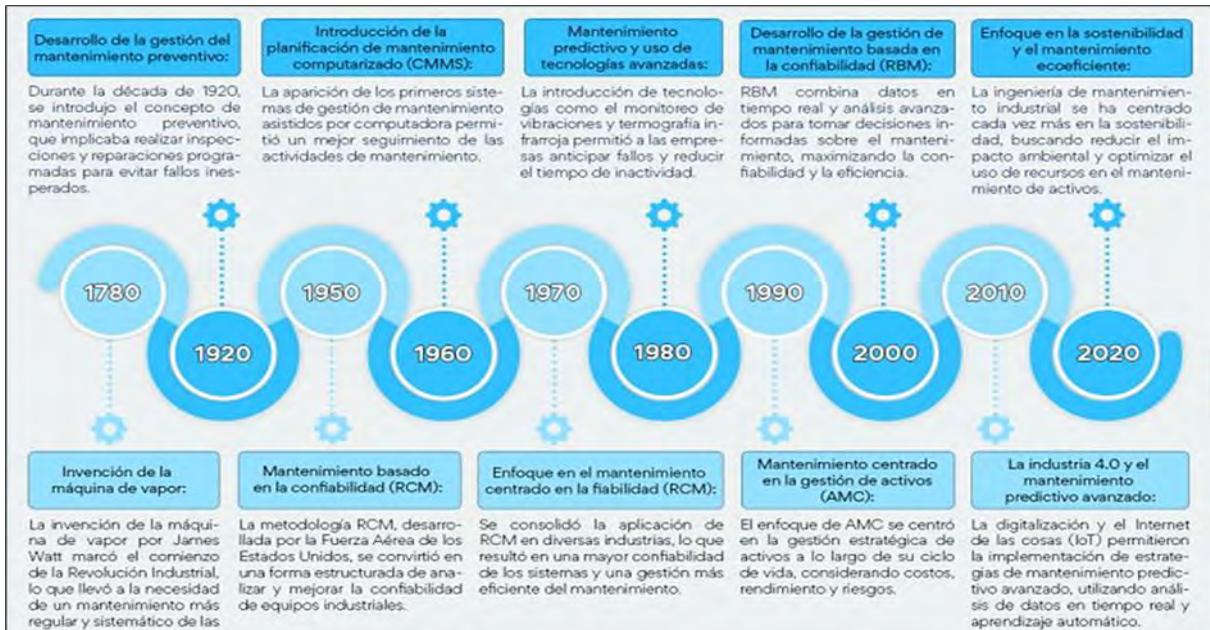
En este contexto, surgieron diferentes filosofías de producción, como el TPM (Mantenimiento Productivo Total), que se inspiró en el Sistema de Producción Toyota (TPS). Posteriormente, se introdujo la Terotecología o Ingeniería del Mantenimiento, una disciplina que combina tecnología y economía para aumentar la fiabilidad y optimizar los recursos en todos los procesos de mantenimiento industrial, con el objetivo de optimizar el rendimiento operativo de las organizaciones. A continuación, surgieron metodologías como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), Análisis Modo de Falla y Efectos (AMEF), Análisis de Causa Raíz (ACR), y Mantenimiento Basado en la Condición (MBC), que contribuyeron a perfeccionar la gestión del mantenimiento.

Más tarde, la gestión del mantenimiento y la gestión de activos se normalizaron a través de estándares ISO, como ISO 14224 e ISO 55000. A pesar de estos avances, en todo este proceso evolutivo no se ha logrado predecir fallas con una alta confiabilidad. En la actualidad, la evolución del mantenimiento está marcada por la revolución tecnológica de la Industria 4.0 y sus tecnologías asociadas, como el *Data Mining*, el *Big Data* y el *Machine Learning*. Se espera que estas tecnologías permitan detectar, predecir y prescribir fallas de manera más precisa y fiable.

En la siguiente Figura 1 se muestra la línea de tiempo del mantenimiento industrial hasta el 2020, en donde se puede observar en resumen los detalles de cada estación del mantenimiento.

Figura 1

Línea de tiempo del mantenimiento industrial hasta el 2020



Nota. Tomado de Ferrera (2022)

1.3. Tipos de mantenimiento industrial

Actualmente a nivel internacional, las industrias están enfocados a tener un desempeño de clase internacional, WCM, por sus siglas en inglés *World Class Maintenance*, se desarrollan varios tipos de mantenimiento:

- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento predictivo
- Mantenimiento proactivo
- Mantenimiento prescriptivo

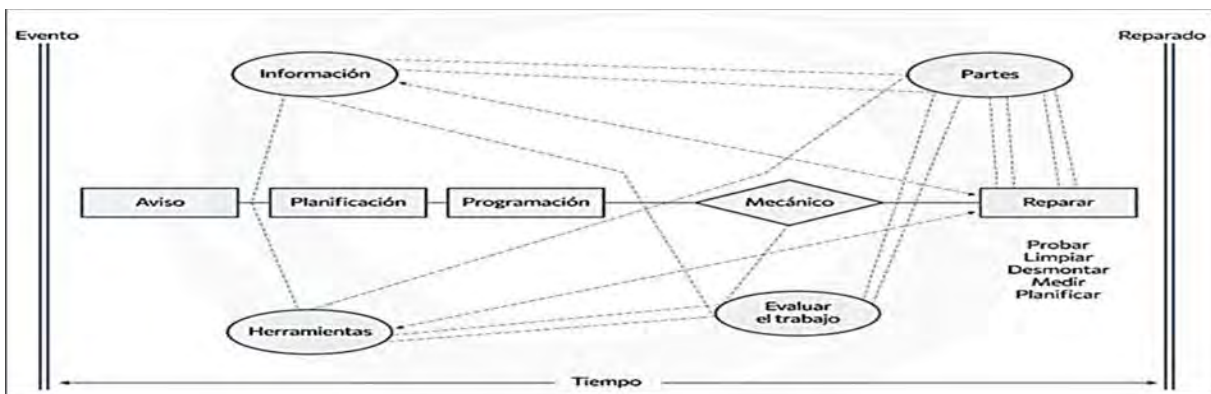
1.3.1. Mantenimiento correctivo

Tavella (2022) sugiere que el mantenimiento correctivo abarca un conjunto de operaciones desplegadas de forma espontánea y sin estructuración previa sobre un activo. Este tipo de mantenimiento se implementa cuando el activo o equipo experimenta una falla, lo que provoca la interrupción del sistema y detiene los procesos asociados al activo. La intervención se realiza de manera inmediata para reducir al mínimo los lapsos de inoperatividad. Además, señala que esta estrategia se basa en la idea de "llevar el equipo o componente a la falla", asegurando la disponibilidad de repuestos en el inventario. El costo asociado dependerá principalmente del tiempo dedicado a la atención, la cantidad de personal de mantenimiento involucrado y el gasto asociado al resguardo de los repuestos.

Así mismo el mantenimiento correctivo, también conocido como mantenimiento reactivo, suma desventajas a los procesos de gestión de mantenimiento, por ser una acción reactiva ante una falta de prevención a fallas, alto potencial de inseguridad al personal, equipo y medio ambiente, y todo ello también se traduce en costos, es por ello por lo que se recomienda aplicar este tipo de mantenimiento a aquellos equipos considerados no críticos para la continuidad de la producción (Contreras, 2020).

En el siguiente Figura 2 se muestra un modelo de mantenimiento correctivo ante una falla.

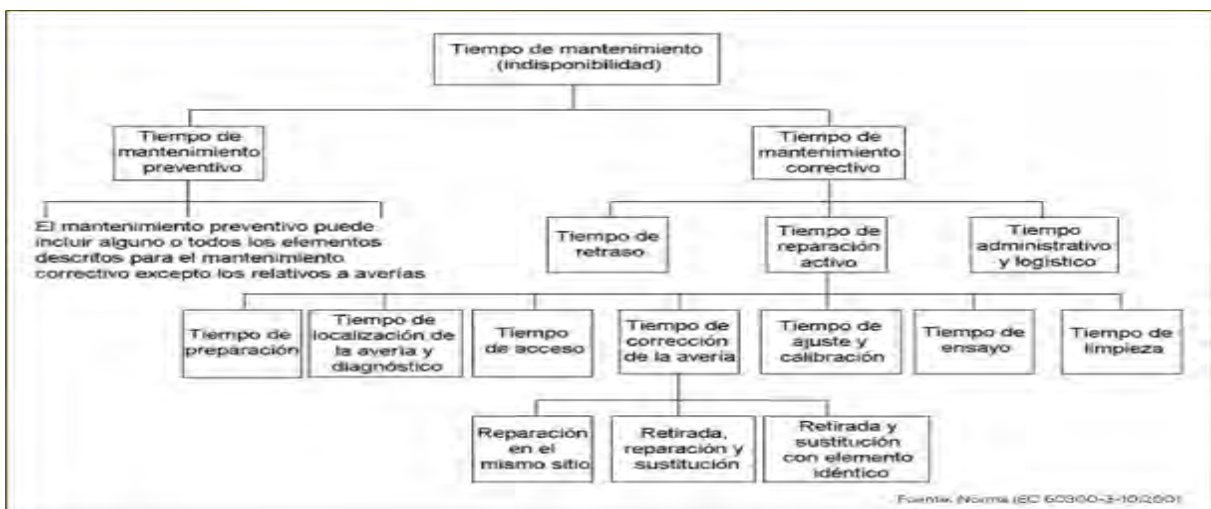
Figura 2
Modelo de mantenimiento correctivo



Nota. Adaptado de Smith, R. Keith (2011)

En la siguiente Figura 3 se muestra una estructura de disposición de tiempo incurrido por el equipo de mantenimiento para la indisponibilidad del equipo el cual se resalta más cuando es una atención de tipo correctiva o reactiva cuando sucede una falla.

Figura 3
Estructura de disposición de tiempo para los tipos de mantenimiento

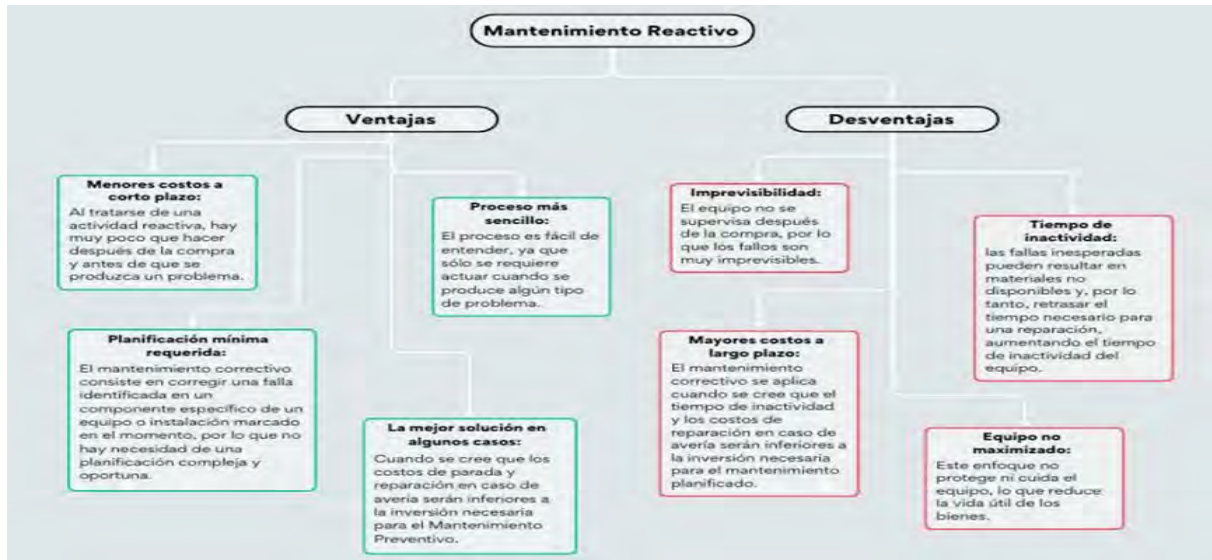


Nota. Adaptado de Norma IEC 60300 (2001)

En la siguiente Figura 4 se muestra de forma estructurada las ventajas y desventajas de la ejecución del mantenimiento reactivo.

Figura 4

Ventajas y desventajas del mantenimiento reactivo



Nota. Tomado <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7096517101263151105/>

1.3.2. Mantenimiento preventivo - PM

Hace referencia al conjunto de acciones y labores que se realizan de manera periódica sobre un activo, equipo, máquina o sistema, siguiendo las indicaciones o recomendaciones del fabricante. Su propósito primordial consiste en identificar condiciones inadecuadas en los elementos o partes del equipo y/o sistema que podrían estar experimentando estados de deterioro o manifestar potenciales de falla a corto o mediano plazo. Estas fallas podrían resultar en paradas inesperadas de los equipos, afectando el sostenimiento de la operatividad productiva (Tavella, 2022).

Esta estrategia de mantenimiento surge como una mejora a los procesos del mantenimiento correctivo, realizando tareas de forma sistemática, ya sea en serie o en paralelo. Se lleva a cabo mediante la inspección y desmontaje de elementos y/o partes del equipo para su observación, permitiendo así realizar reparaciones o cambiar elementos en estados de desgaste. Todo este proceso tiene como finalidad prevenir la ocurrencia de fallas durante la operación del equipo y evitar interrupciones en la producción (Contreras, 2020).

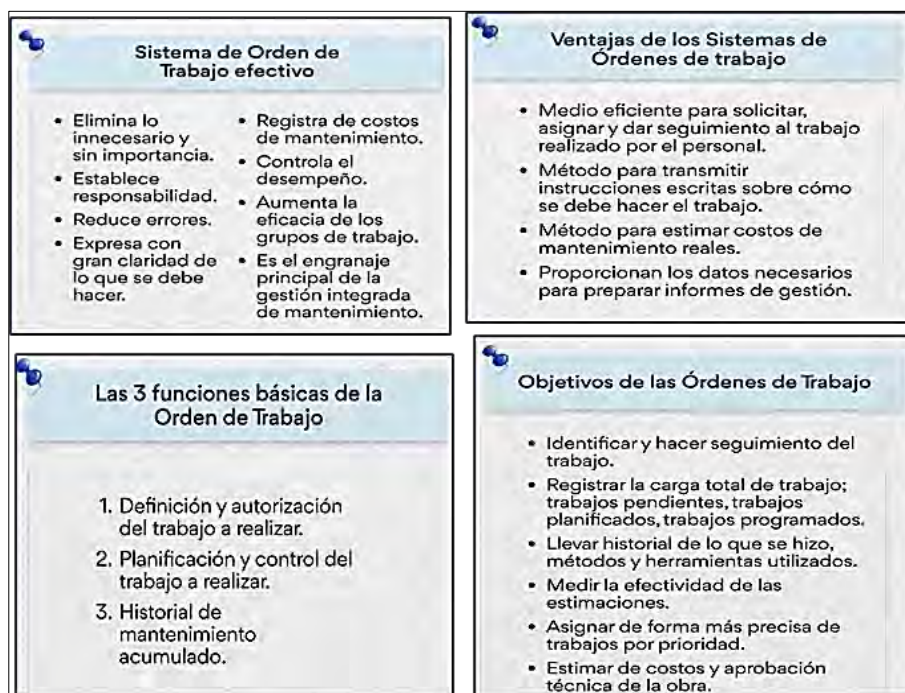
El mantenimiento preventivo se aborda desde dos perspectivas. La primera, se centra en el tiempo, es decir, en la frecuencia con la que se interviene en el activo. Esta frecuencia puede estar determinada por las recomendaciones del fabricante o por un análisis de confiabilidad. La segunda, se basa en la condición de desgaste. Muchos textos y tesis destacan que el enfoque preventivo basado en la condición maximiza el periodo de utilidad del activo y contribuye a la reducción de los gastos asociados al cuidado y preservación del activo.

En el contexto de empresas mineras, el mantenimiento preventivo se realiza mediante la ejecución de protocolos de prueba, listas de verificación de tareas a realizar o los conocidos "job cards". Se aplican procedimientos técnicos de mantenimiento para estandarizar la ejecución, utilizando los mismos equipos de prueba y consideraciones de toma de decisiones para cada tipo y modelo de equipo, considerando su influencia en la ininterrupción de la producción.

La planificación del mantenimiento preventivo se realiza mediante una orden de trabajo, con el objetivo de atender periódicamente a un equipo o sistema, en tiempo de ejecución, con recursos (personal y repuestos), facilidades y herramientas, especialmente con el equipo detenido. En la siguiente Figura 5 se detallan las características que contiene una orden de trabajo de mantenimiento estándar.

Figura 5

Características de una orden de trabajo estándar



Nota. Tomado de Ferrera (2022)

1.3.3. Mantenimiento predictivo - PdM

El mantenimiento predictivo comprende un conjunto de actividades y tareas destinadas a obtener un diagnóstico oportuno del estado funcional de un equipo, con el objetivo de detectar rápidamente averías, síntomas de falla o condiciones irregulares. La agilidad en este proceso se consigue a través de la utilización de herramientas y equipos altamente perfeccionados destinado al diagnóstico. Estos instrumentos permiten monitorear de manera constante el estado operativo del equipo, realizando mediciones y análisis de diversas variables como temperatura, vibración, sonido, consumo de energía, nivel de contaminación de aceites, espesor, aislamiento, entre otros (Contreras, 2020).

El mantenimiento predictivo posibilita el seguimiento y análisis de la progresión de condiciones de falla, optimiza la gestión del personal de mantenimiento, proporciona información histórica sobre el estado del equipo y las acciones tomadas ante condiciones "insalubres" del equipo. Así mismo, establece límites de operación y condiciones de falla, desempeñando un papel crucial en la toma de decisiones para la parada oportuna de un equipo. Esta intervención puede ser tanto correctiva, planificada o no planificada, ante una condición inminente o súbita de falla que podría desencadenar una parada inesperada del equipo (Mora, 2009).

Contreras (2020) destaca la existencia de cinco técnicas fundamentales de mantenimiento predictivo, esenciales para una gestión eficaz de activos:

- **Termografía:** estudio y análisis de las temperaturas que se generan en las máquinas.
- **Análisis por Ultrasonido:** examen y estudio de las ondas acústicas de frecuencia elevada (mayores a 20kHz) que se generan en los equipos al presentar alguna falla. Permite detectar: fricción, fugas, en válvulas, pérdidas de vacío, arco eléctrico.
- **Análisis de corrientes en máquinas eléctricas:** estudio y análisis de parámetros eléctricos de consumo de corriente en los motores que accionan equipos, ayudan a diagnosticar eléctricamente el estado de un motor.
- **Análisis de Vibraciones:** estudio y análisis de las vibraciones que se generan durante el funcionamiento normal de un equipo rotativo y más aún cuando está generándose alguna falla en algún eje geométrico del equipo (vertical, horizontal, axial). Permite detectar: desbalance y resonancia en motor, soldaduras mecánicas, rodamientos en mal estado, problemas en bombas y engranajes.
- **Tribología:** Examinar y analizar las circunstancias de impurezas en fluidos viscosos, como aceites y grasas; disciplina que se enfoca en el estudio de la dinámica de fricción, desgaste y procesos de lubricación.

En la siguiente Figura 6 se puede observar las tecnologías que utiliza el mantenimiento predictivo para recopilar datos e información de los equipos o máquinas en campo.

Figura 6

Tecnologías de mantenimiento predictivo



Nota. Tomado de Castillo (2019)

En la figura 7 se ilustra el empleo actual de la técnica de mantenimiento predictivo y la estimación a cuánto evolucionará en 5 años.

Figura 7

Proyección mantenimiento predictivo en los próximos 5 años



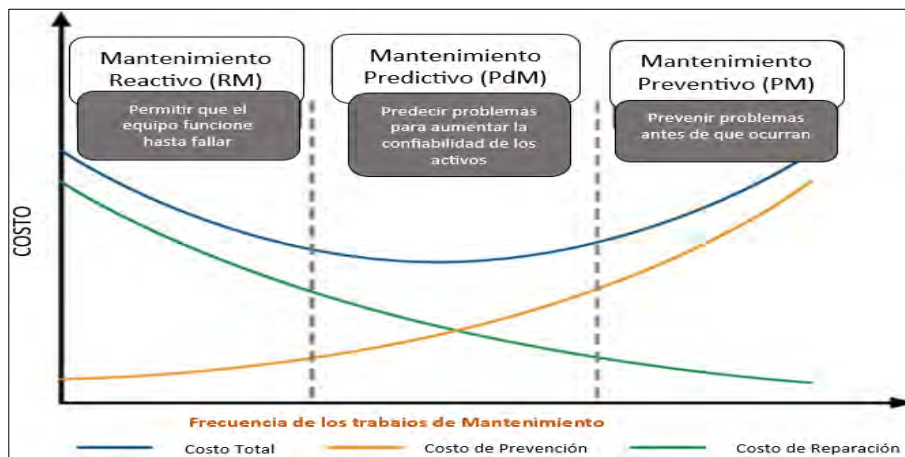
Nota. Adaptado de Gonzales (2021)

En la Figura 8 se detalla un ejemplo de los procesos de mantenimiento predictivo implementado por la empresa Siemens, cuya aplicación ya está sistematizado y orientado al uso y aplicación *Machine Learning* e Inteligencia artificial para detección de fallas y eventos anómalos a partir de datos históricos registrados por las diferentes técnicas del PdM.

Figura 8*Módulo o procesos de mantenimiento predictivo*

Nota. Adaptado de Gonzales (2021)

En lo que respecta a la relación entre costos y frecuencia de mantenimiento, la Figura 9 indica que el enfoque predictivo implica la inversión más baja en el cuidado y gestión de equipos o maquinaria.

Figura 9*Costos versus frecuencia de mantenimiento*

Nota. Adaptado de Gonzales (2021)

1.3.4. Mantenimiento Proactivo

Corresponde al conglomerado de labores y tareas metodológicas que se ejecutan sobre el activo de manera temprana con el propósito de prolongar la vida útil del activo y reducir las actividades o tareas de mantenimiento a través del diagnóstico oportuno del estado funcional de los equipos con tecnologías predictivas, es considerado un

mantenimiento táctico enfocado en la detección y corrección temprana de las causas que ocasionan condición de desgaste y falla (potencial y funcional) del equipo (Mora, 2009).

Tume (2022) indica que es una estrategia de mantenimiento enfocado a el reconocimiento y subsanación de las causas raíz de las fallas en equipos-máquinas, implementando de manera temprana las soluciones correctas para elevar la calidad de la mantenibilidad, disponibilidad y confiabilidad del sistema o activos físicos en una planta industrial, así mismo refiere los siguientes beneficios en su desarrollo o aplicación:

- Posibilita el análisis temprano de una falla sintomática reversible desde su origen, gracias a su capacidad de detección sensible.
- Suministra información orientada a abordar las causas subyacentes de las fallas en lugar de sus efectos.
- Minimiza los costos asociados con fallas sintomáticas irreversibles.
- Proporciona una visión limitada del estado de los componentes, facilitando la elección del momento más adecuado para su reemplazo o reparación.
- Extiende la vida útil de equipos que, de lo contrario, podrían experimentar fallas sintomáticas irreversibles debido a la causa raíz.

Para comprender mejor, en la siguiente Figura 10 se muestra una tendencia en tiempo del rendimiento y disponibilidad de los equipos en función al mantenimiento que recibe los equipos o máquinas, se observa que el mantenimiento predictivo y proactivo serán los que ayuden hacer que los activos tengan una mejor optimización en su ciclo de vida.

Figura 10

Disponibilidad y rendimiento de activos



Nota. Tomado Maisueche (2019)

1.3.5. Mantenimiento Prescriptivo (RxM)

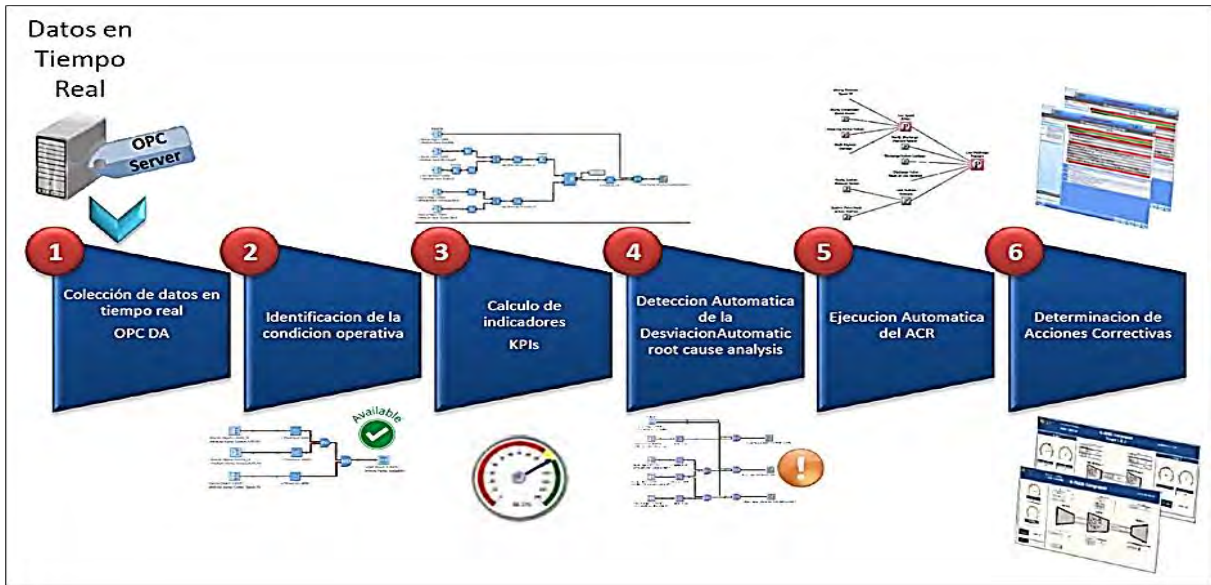
Según la real academia española, RAE, prescribir es “ordenar o decidir la obligatoriedad de una cosa”; en términos médicos, implica indicar o mandar seguir un tratamiento específico. En este contexto, el mantenimiento prescriptivo engloba diversas acciones o actividades y tareas encargadas de recopilar y analizar datos. Posteriormente, se realiza un diagnóstico, pronóstico y se emiten recomendaciones especializadas para brindar una atención oportuna y óptima a las condiciones o síntomas de falla de un componente o activo. Este enfoque complementa la información obtenida y analizada a través del mantenimiento predictivo (González, 2021).

Castillo (2019) señala que el RxM representa una evolución del mantenimiento proactivo, integrando la aplicación de tecnología operativa (OT) y tecnología de información (IT). Forma parte de las estrategias de mantenimiento basadas en el análisis de volúmenes significativos de información mediante la ejecución de algoritmos. Estos algoritmos permiten la detección de información que identifica condiciones anormales de funcionamiento u operación de los equipos, así como posibles fallas (análisis y diagnóstico). Posteriormente, genera recomendaciones para corregir la condición identificada, prescribiendo acciones específicas. Surge como una necesidad para potenciar la eficiencia en el empleo de las tecnologías, mejorar la eficiencia en el uso de recursos, retener y generar conocimiento, filtrar y eliminar información innecesaria, disminuir el tiempo de las evaluaciones, diagnóstico y emisión de recomendaciones, aplicar conocimientos de Análisis de los Modos, Efectos, Causas y las Criticidades de las Fallas (FMECA), Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), Análisis de Causa Raíz (ACR) y automatizar tareas repetitivas de análisis con detección de patrones.

El modelo de mantenimiento prescriptivo está basado en el conocimiento, familiarización y experiencia que se tiene del activo bajo un contexto operacional.

En la Figura 11 se muestra los procesos que comprende la lógica del mantenimiento prescriptivo.

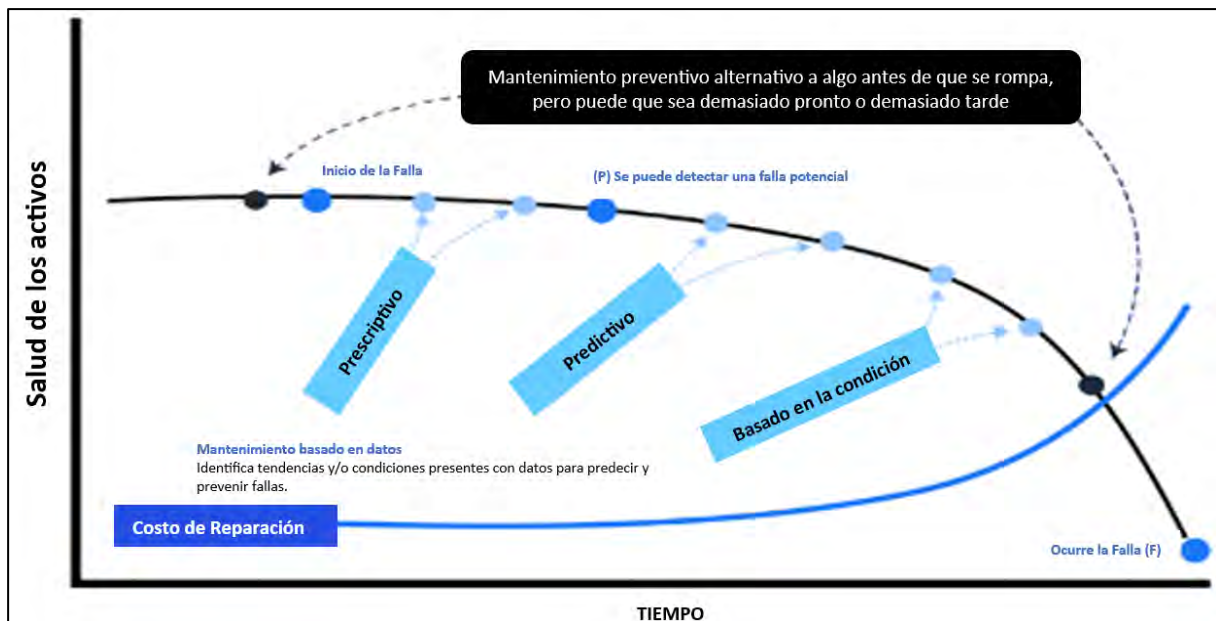
Figura 11
Lógica del mantenimiento prescriptivo



Nota. Tomado Castillo (2019)

En la Figura 12 se presenta una curva PF de análisis de fallas y sus formas de atención en las etapas de falla potencial, falla funcional y falla total, se observa que el mantenimiento prescriptivo está mucho antes de la falla potencial, ya que identifica el modo de falla en el corto tiempo después que la falla se genera o inicia funcionalmente.

Figura 12
Curva P-F y el tipo de atención en las etapas de falla

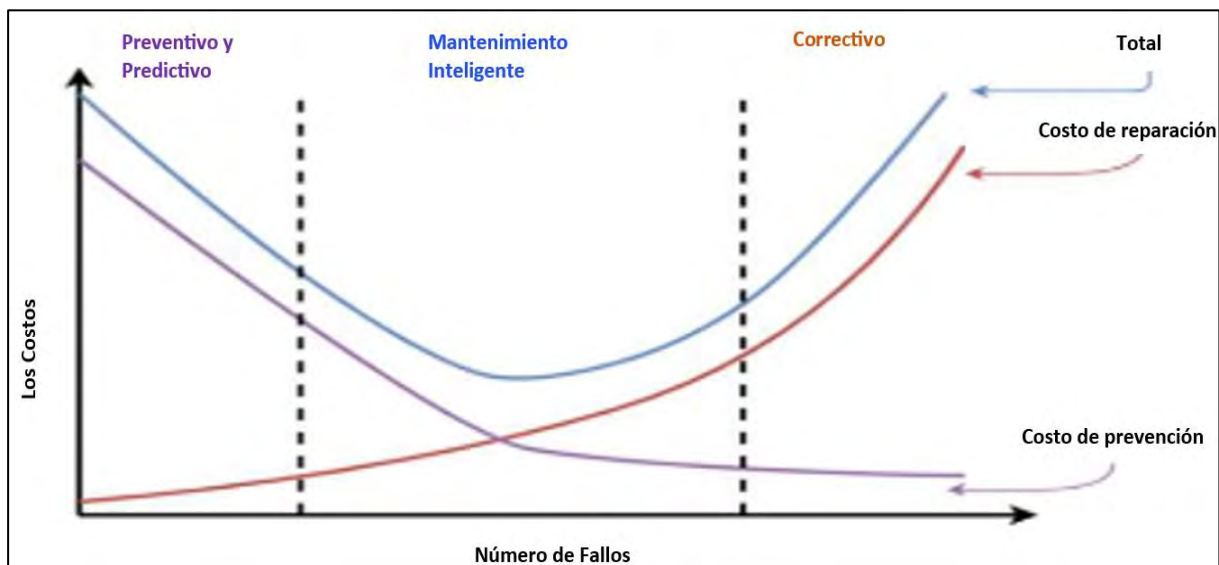


Nota. Adaptado de Castillo (2019)

Así, en la curva que representa el número de fallas y los costos, se produce una transformación notable cuando el mantenimiento prescriptivo evoluciona hacia un enfoque más inteligente. Este último se revela como la opción de menor costo total al abordar de manera preventiva las posibles fallas. La Figura 13 ilustra un diagrama de los costos asociados al mantenimiento predictivo y correctivo en comparación con el mantenimiento inteligente.

Figura 13

Diagrama de costos asociado a mantenimiento



Nota. Adaptado de Brand (2023)

1.4. Ingeniería y Planificación de Mantenimiento

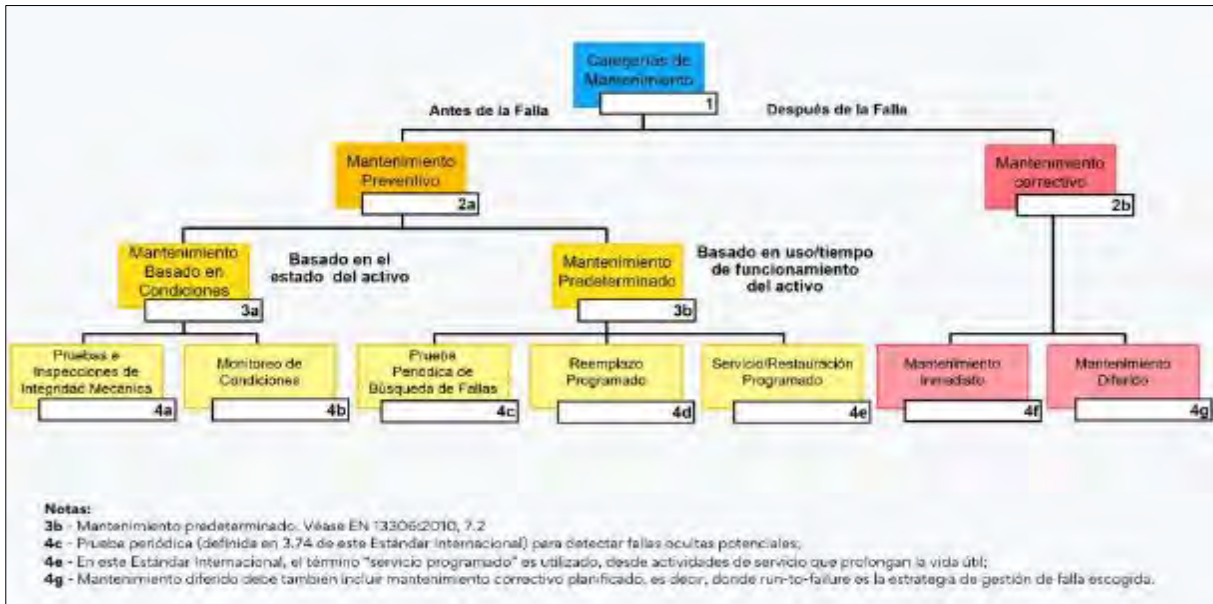
1.4.1. Estrategias para optimización de mantenimiento industrial

Hasta la fecha y en paralelo al progreso tecnológico en el campo de la comunicación e información, así como la transformación digital, la industria 4.0 e incluso la industria 5.0, las empresas se enfocan en optimizar la utilización de máquinas y activos físicos, con el objetivo inherente de prolongar la vida útil de los activos que presentan altos índices de mantenibilidad. En consecuencia, los responsables de la gestión de activos están incorporando y fusionando prácticas destacadas de ingeniería de mantenimiento, confiabilidad y planificación en la gestión de mantenimiento. Esto se hace con el fin de proporcionar la mejor atención a los equipos a lo largo de su ciclo de vida, abarcando tanto los períodos de operación como los de mantenimiento.

Las estrategias para la gestión de activos y mantenimiento están normalizadas y estandarizadas, sirviendo como guía para una estructura operativa, táctica y estratégica adecuada en los procesos de mantenimiento para cada tipo de sistema o equipo, según el sector industrial o tipo de industria. (ver figura 14 y 15).

Figura 14

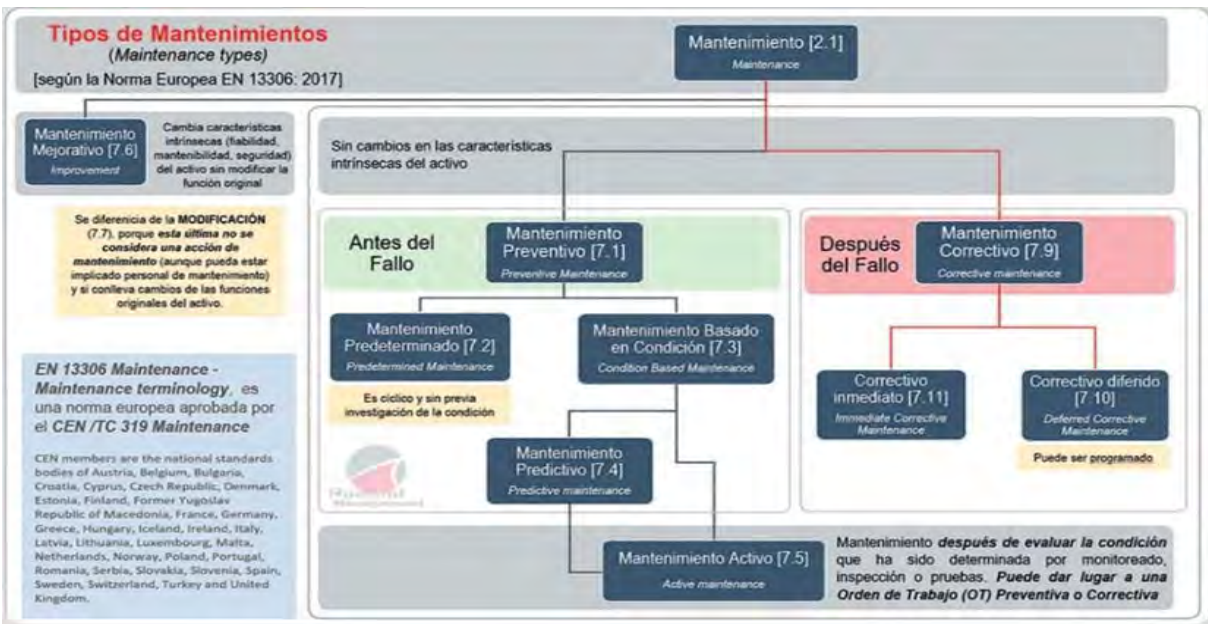
Categorías de mantenimiento bajo estándar ISO 14224-2016



Nota. Tomado de la Norma ISO 14224 (2016)

Figura 15

Tipos de Mantenimiento según la norma EN 13306:2017

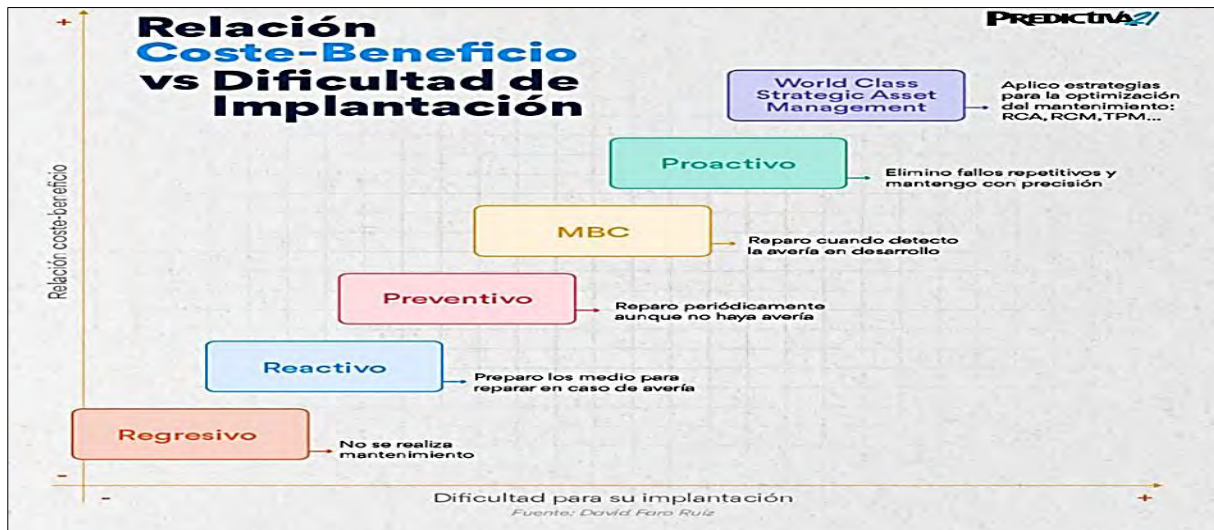


Nota. Tomado de la Norma UNE13306 (2017)

La implementación adecuada de cada una de las estrategias estandarizadas a nivel mundial, como la norma internacional ISO55000, conlleva un grado de dificultad y costos. El propósito detrás de este esfuerzo es lograr que los procesos de mantenimiento alcancen el reconocimiento como WCM, es decir, mantenimiento de clase mundial. La relación entre estos elementos se visualiza en la figura 16.

Figura 16

Relación Costo-Beneficio versus Dificultad de implementación



Nota. Tomado de Ferrera (2022)

1.4.2. Mantenimiento centrado en confiabilidad RCM

El mantenimiento centrado en confiabilidad, RCM por sus siglas en inglés (*Reliability Centered Maintenance*), surgió en la industria internacional de la aviación. Se trata de una metodología integrada en las estrategias de mantenimiento, cuyo propósito es asegurar que un equipo o máquina funcione o cumpla las funciones esperadas por el usuario. Esto se logra mediante el correcto mantenimiento y la búsqueda de modificaciones necesarias para incrementar su confiabilidad y disponibilidad. Bajo esta metodología, el personal de mantenimiento se enfrenta al desafío de pensar y actuar de manera diferente (Velásquez, 2019).

La aplicación, implementación y desarrollo del RCM están estandarizados, con la norma SAE JA1011 que detalla los requisitos mínimos para que un proceso de mantenimiento esté alineado con el RCM, y la norma SAE JA1012 que sirve como guía para la implementación estructurada y el desarrollo del RCM.

Mora (2009) desglosa las ventajas del RCM, enfocándose en la excelencia de calidad, el tipo de servicio prestado, la gestión de costos, la eficiencia temporal y la administración de riesgos. El propósito central es ampliar la disponibilidad y mermar los costos asociados a disfunciones y paralizaciones de equipos. La Figura 17 detalla minuciosamente estos beneficios, subrayando que el RCM no solo incrementa la mejora en la percepción del rendimiento de los equipos, sino que también crea mecanismos para prevenir tales fallos y establece un conjunto de medidas que posibilitan el mantenimiento o la mejora de una elevada disponibilidad en la planta.

Figura 17
Beneficios del RCM

CALIDAD	TIPO DE SERVICIO	COSTO	TIEMPO	RIESGO
Aumenta la disponibilidad en al menos un 8%, por el sólo hecho de implementar.	Proporciona un mejor clima organizacional para el trabajo en equipo.	Reduce los niveles de mantenimiento al menos en un 40%.	Mejora los tiempos medios de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad al menos en un 25%.	Brinda seguridad e integridad ambiental en todo el desarrollo del proceso, a niveles muy superiores de los que se tienen antes de implementarlo.
Elimina las fallas crónicas y elimina causas raíces.	Ayuda a entender mejor las necesidades y los requerimientos de los clientes.	Optimiza los programas de mantenimiento.	Aumenta los tiempos de funcionalidad de los equipos al menos en un 150% en promedio.	Las fallas con consecuencias sobre el medio ambiente o la seguridad son las que más se atacan y eliminan.
Aumenta la flexibilidad operacional.	Disminuye las paradas imprevistas.	Reduce los costos planeados o no de mantenimiento al menos en un 40%.	Reduce o elimina los tiempos de demora en suministros o búsqueda de recursos o repuestos.	Reduce al mínimo la posibilidad de fallas en cadena o súperpuertas.
La programación de mantenimiento se basa en hechos reales.	Genera un ambiente de investigación y desarrollo alrededor de los análisis de fallas.	Alarga la vida de los equipos para propósitos especiales.	Jerarquiza las actividades de mantenimiento, logrando su reducción en el tiempo.	Su razón de calificación al riesgo la hace como una de las tácticas más seguras.
Proporciona el completo conocimiento de las fallas reales y potenciales de las máquinas, así como de sus causas.		Todas las actividades de mantenimiento se analizan en un contexto de costo/beneficio.		

Nota. Tomado de Mora (2009)

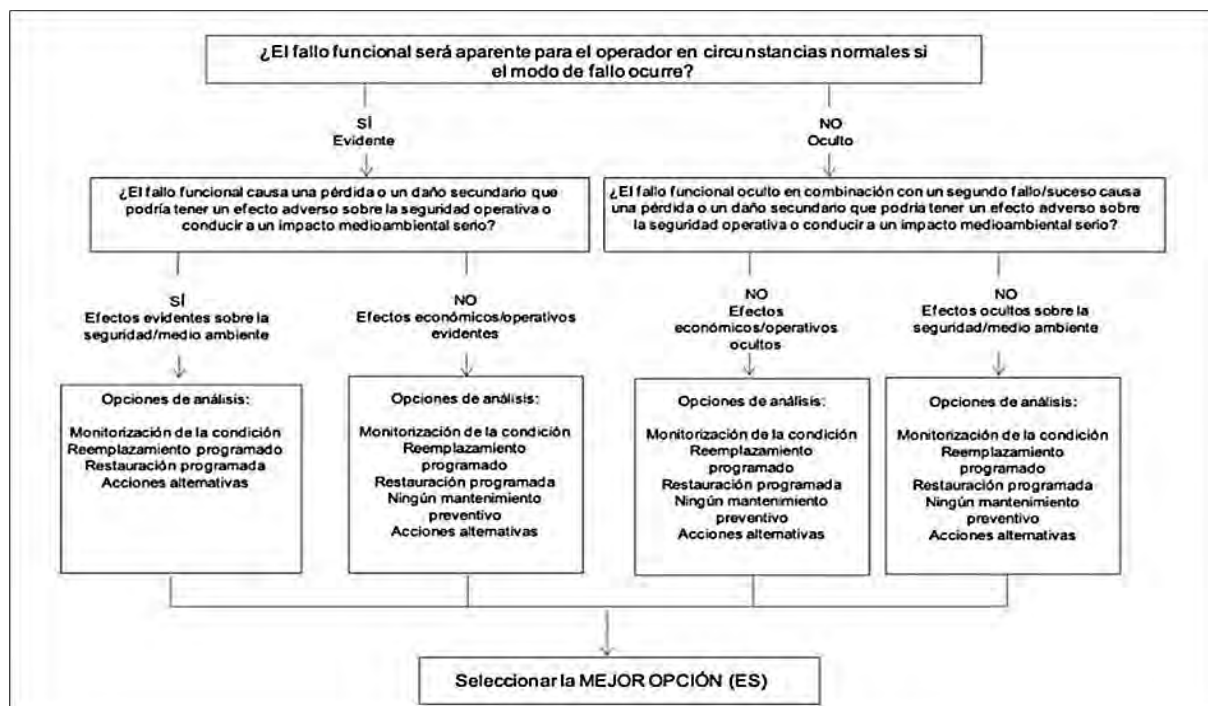
Por otra parte, Velásquez (2019) enfatiza de manera significativa los principios fundamentales que deben regir la aplicación del RCM:

- Mantener la operatividad del sistema
- Detectar los posibles modos de falla que puedan impactar el funcionamiento del sistema
- Establecer una jerarquía de prioridades entre los modos de fallo
- Elegir estrategias adecuadas y efectivas para gestionar los modos de fallo
- Optimizar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos reduciendo al mínimo la probabilidad de fallas en el sistema
- Seleccionar las tácticas de mantenimiento que ofrezcan la mejor relación costo/beneficio para cada modo de fallo

La figura 18 muestra el diagrama de decisión de RCM.

Figura 18

Esquema de toma de decisión aplicado al RCM



Nota. Adaptado de la Norma UNE-60300 (2009)

De acuerdo con las normas SAE JA1011 y JA1012, se establecen los requisitos que un proceso RCM debe cumplir. Según esta normativa, todo proceso RCM debe abordar de manera sistemática y disciplinada siete preguntas fundamentales:

1. ¿Cuáles son las características que se buscan en el equipo que está siendo evaluado? Lo que el usuario desea que el activo haga.
2. ¿Cuáles son los fallos o estados de mal funcionamiento relacionados con estas funciones específicas? Analizar los posibles modos de falla que podrían afectar el cumplimiento de las funciones críticas del activo.
3. ¿Cuáles son las potenciales razones de cada uno de estos estados de mal funcionamiento, también conocidos como modos de falla? Se debe investigar las raíces de los modos de falla para comprender las causas fundamentales.
4. ¿Cuáles son los efectos de cada una de estas fallas? Se analiza que ocurre cuando se produce la falla.
5. ¿Cuáles son las repercusiones de cada fallo? Razones por la que importa cada falla.
6. ¿Cuáles son las medidas que pueden tomarse para anticipar o evitar la ocurrencia de la falla? Se determinan las actividades de mantenimiento preventivo necesarias para evitar o minimizar los modos de falla identificados.

7. ¿Cuál sería la acción recomendada en caso de que no sea posible identificar una medida predictiva o preventiva adecuada para evitar o reducir al mínimo las consecuencias de la falla? Se establecen estrategias para corregir y mejorar las actividades de mantenimiento en caso de que no cumplan su propósito.

Valencia (2022) señala que, tras abordar las siete interrogantes fundamentales, resulta imperativo considerar las etapas subsiguientes para la ejecución del RCM:

- Seleccionar el equipo mediante un análisis de criticidad, identificando los activos que poseen un impacto significativo en los objetivos de la organización.
- Definir las funciones del equipo, estableciendo claramente las tareas y responsabilidades que el equipo debe desempeñar en el contexto operativo.
- Identificar las fallas funcionales del equipo, evaluando las posibles desviaciones de las funciones previstas y sus implicaciones en la operación.
- Reconocer los modos de falla del equipo, categorizando y analizando las diferentes formas en que el equipo puede experimentar fallos.
- Determinar los efectos de las fallas y sus consecuencias, evaluando el impacto operativo, ambiental y de seguridad asociado con cada modo de falla identificado.
- Aplicar la lógica del RCM para seleccionar la estrategia de mantenimiento más apropiada, considerando factores como la criticidad, la frecuencia de ocurrencia y la detección de la falla.
- Documentar y ajustar el programa de mantenimiento conforme se adquiera experiencia en el terreno, utilizando la retroalimentación operativa para optimizar continuamente las estrategias de mantenimiento y mejorar la confiabilidad del equipo.

1.4.3. Mantenimiento Productivo Total (TPM)

Según Díaz, García y Martínez (2019) indican que el término TPM desde 1989 tuvo varios enfoques de definición, pero el más reciente se enmarca en los años 2015-2017, donde se refiere a TPM como Mantenimiento Productivo Total, por sus siglas en inglés *Total Productive Maintenance*, donde se infiere que es la combinación de las operaciones de mantenimiento preventivo con la filosofía de control de la calidad total, integrando también al área de ingeniería para de ese modo garantizar que las máquinas funcionen siempre correctamente y los empleados los cuiden adecuadamente y proactivamente, identificando fallas lo antes posible para evitar que sucedan bajo el enfoque de cero errores, cero daños y cero pérdidas, con una visión de uso efectivo de los equipos de clase mundial en términos de calidad y costo.

Tokutaro Suzuki (1995) indica que se puede lograr cero averías de los equipos logrando ejecutar 4 fases en la atención óptima de los activos físicos:

- Fase1: Regularizar los lapsos entre incidentes
- Fase2: Prolongar la duración operativa del equipo
- Fase3: Recuperar de forma periódica el desgaste
- Fase4: Anticipar la expectativa de vida del equipo

Así mismo indica que estas cuatro fases tienen sus acciones en detalle en seis medidas:

- Medida 1: Establecer condiciones básicas de operación o funcionamiento
- Medida 2: Cumplir condiciones de uso o utilización
- Medida 3: Detectar, restaurar, prevenir y predecir el deterioro
- Medida 4: Eliminar ambientes propensos a un desgaste acelerado
- Medida 5: Corregir debilidades del diseño
- Medida 6: Mejorar capacidad de gestión y mantenimiento efectivo de equipos, asegurando reparaciones libres de errores, y la correcta operación o manipulación del equipo.

Las responsabilidades directas son: las tres primeras medidas son para el área de producción o procesos, a los operadores y líderes de procesos productivos, y las tres últimas medidas son de responsabilidad del área de gestión de activos físicos y mantenimiento.

Dentro de la figura 19, se ofrece una explicación detallada y completa que abarca las 12 etapas fundamentales que constituyen los programas de desarrollo del TPM, proporcionando así una guía comprensiva para su implementación efectiva.

Figura 19
12 etapas del TPM



Nota. Tomado de Paredes (2023)

En el Perú, se está promoviendo activamente la educación y la implementación del TPM en diversas industrias debido a su alto valor productivo y sus beneficios en términos de costos. Según Paredes (2023), el TPM se aborda con una visión estratégica que busca transformar la naturaleza misma de la empresa al cambiar la mentalidad de las personas y el estado y funcionamiento de los equipos y máquinas. El objetivo es empoderar a los operadores para que realicen mantenimiento autónomo, capacitar al personal de mantenimiento en la atención especializada de los equipos y permitir que los ingenieros diseñen equipos que requieran un mínimo mantenimiento. Todo ello se realiza con el enfoque de optimizar el rendimiento de los equipos y máquinas, logrando ciclos de vida con costos óptimos. La figura 20 muestra los 8 pilares del TPM.

Figura 20
 Los 8 pilares del TPM



Nota. Tomado de Paredes (2023)

1.4.4. Indicadores de Mantenimiento Industrial y ACR

Los Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs), acrónimo en inglés de *Key Performance Indicators*, son ratios o métricas estandarizadas a nivel mundial que evalúan factores críticos para el éxito de una organización. Estos indicadores sirven para medir el rendimiento o desempeño en relación con los objetivos asociados a las fallas de los activos físicos, equipos o máquinas, los tiempos de reparación, los retrasos en el mantenimiento y los costos.

En la Figura 21, se destacan los principales indicadores de mantenimiento industrial que también son aplicables en el sector industrial minero. Estos indicadores están intrínsecamente relacionados con el comportamiento o desempeño de los equipos, máquinas o sistemas.

Figura 21

Indicadores de mantenimiento industrial

Nombre	Descripción	Fórmula
MTBF	Métrica para estimar el tiempo promedio entre dos fallas consecutivas de un sistema o componente.	$MTBF = \frac{\text{Suma de horas de trabajo en buen estado}}{\text{Número de intervenciones realizadas}}$
MTTR	Mide el tiempo promedio que tarda en repararse un componente o sistema después de una falla.	$MTTR = \frac{\text{Suma de los tiempos de reparación}}{\text{Número de intervenciones realizadas}}$
OEE	Sirve para medir la productividad y la eficiencia de todos los procesos de fabricación.	$OEE = \text{Disponibilidad} \times \text{Desempeño} \times \text{Quality}$
Disponibilidad	Capacidad de un activo o sistema de estar disponible y operativo cuando se requiere	$\text{DISPONIBILIDAD} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100$
Confiabilidad	Capacidad de un activo de mantener su funcionamiento durante un periodo de tiempo determinado	$\text{CONFIABILIDAD} = R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$
Backlog	Muestra la relación entre la demanda de trabajos y la capacidad de poder atenderlos.	$\text{BACKLOG} = \frac{\sum \text{HH Registro de los trabajos}}{\sum \text{total HH Factor de productividad (\%)}} \times 100$

Nota. Tomado de Ferrera (2022)

Todos los procesos de gestión del mantenimiento y activos físicos tienen indicadores auxiliares también estandarizados que ayudan en gran medida poder tener en detalle o explicar en mejor medida los indicadores principales. En la Figura 22 se muestra los indicadores más utilizados para temas con el desempeño del personal de mantenimiento, repuestos y cumplimientos de la ejecución de mantenimiento.

Figura 22

Indicadores más utilizados en mantenimiento

Tasa de fallas (FR)	=	$\frac{\text{Número de Fallas}}{\text{Tiempo Total de Funcionamiento}}$
Porcentaje de Cumplimiento Mantenimiento Preventivo	=	$\frac{\text{Tareas de Mantenimiento Preventivo Realizadas}}{\text{Tareas de Mantenimiento Preventivo Programadas}} *100$
Tiempo de Respuesta de Mantenimiento:	=	$\text{Hora de Inicio de la Reparación} - \text{Hora de Reporte de la Falla}$
Índice de Eficiencia del Mantenimiento (IME)	=	$\frac{\text{Tiempo de Funcionamiento}}{\text{Tiempo de Funcionamiento} + \text{Tiempo de Reparación}} *100$
Horas de Capacitación en Mantenimiento por Técnico	=	$\frac{\text{Horas Totales de Capacitación}}{\text{Número de Técnicos}}$
Porcentaje de Utilización de Repuestos	=	$\frac{\text{Valor de Repuestos Utilizados}}{\text{Valor de Repuestos en Inventario}} *100$
Ratio de Fallos Graves (SFR)	=	$\frac{\text{Número de Fallos Graves}}{\text{Número Total de Fallas}}$
Porcentaje de Cumplimiento de Programa de Mantenimiento	=	$\frac{\text{Porcentaje de Cumplimiento}}{\text{Tareas de Mantenimiento Realizadas / Tareas de Mantenimiento Programadas}} *100$

Nota. Tomado de Ferrera (2022)

El Análisis Causa Raíz, también reconocida como ACR, involucra un compendio de métodos, esquemas o procedimientos destinados a desentrañar los elementos instigadores de las fallas. Estos elementos guardan relación con aspectos humanos, procesuales y tecnológicos. El propósito primordial para escudriñar y documentar las causas de los incidentes reside en facilitar la determinación de medidas correctivas apropiadas con el fin de evitar la repetición y, de esta manera, resguardar la salud y seguridad de los trabajadores y el ecosistema. El ACR es metódico y se ejecuta con el propósito de descubrir las causas fundamentales de un evento de fallo o del modo y consecuencia de la falla (Dueñas et al., 2020).

Los indicadores de desempeño KPIs son valores referenciales para poder preguntarse ¿por qué tal equipo tiene determinado valor inadecuado de disponibilidad o confiabilidad?, entonces se aplica el ACR para poder estudiar y analizar las fallas que fueron causa del bajo porcentaje de disponibilidad y confiabilidad. En la siguiente Figura 23 se presentan las fases o procesos para realizar un ACR.

Figura 23

Procesos para realizar ACR



Nota. Tomado de Dueñas et al. (2020)

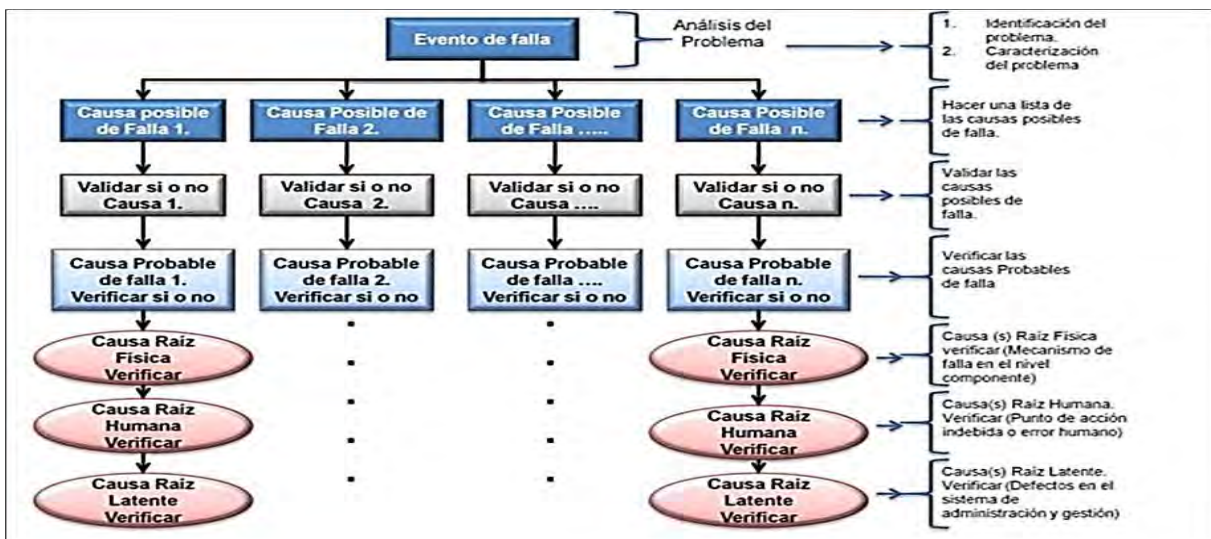
A nivel internacional se conocen cuatro metodologías para realizar una ACR:

- Los 5 Porqués
- Representación gráfica de espigas de pescado o diagrama causa-efecto, comúnmente conocido como Ishikawa.
- Árbol de fallos
- Árbol lógico.

En la siguiente figura 24 se presenta un esquema de secuencia para un ACR con la utilización de Árbol Lógico, el cual es el más funcional para poder adaptarlo a algoritmos lógicos y llevarlo a un software.

Figura 24

Secuencia para un ACR con la metodología de Árbol Lógico



Nota. Tomado de Dueñas et al. (2020)

1.4.5. Mantenimiento basado en condición (MBC)

El Mantenimiento Basado en la Condición, también conocido por sus siglas en inglés como *Condition-Based Maintenance* (CBM), se trata de una modalidad de mantenimiento preventivo que se fundamenta en la evaluación física de la condición de un equipo o máquina. La valoración de la condición puede derivar de la observación técnica del operador y/o del monitoreo de los parámetros de funcionamiento del equipo o sistema. Estos parámetros están sujetos a límites predefinidos para verificar el comportamiento funcional del equipo. El monitoreo se realiza siguiendo una frecuencia o intervalo establecido mediante una evaluación de la criticidad de los equipos en la planta. Se definen variables específicas para cada tipo de equipo que deben ser monitoreadas y controladas, estableciendo límites de control para cada una de ellas (Velázquez, 2019).

Como se indicó en el acápite de mantenimiento predictivo, las tecnologías que ayudan de sobremanera al monitoreo de condiciones son: análisis vibracional, termografía infrarroja, análisis de aceite, ensayos no destructivos (NDT), análisis de corrientes, análisis de ultrasonido, tribología, entre otros.

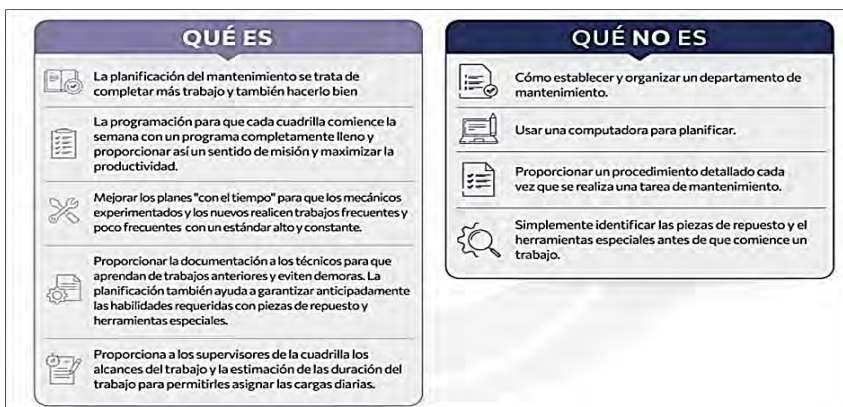
1.5. Planificación de mantenimiento

La planificación representa una estrategia clave en el proceso de mantenimiento de los equipos o máquinas en una empresa industrial, con el propósito fundamental de optimizar la utilización de estos y maximizar la capacidad productiva instalada. Esta dimensión cobra especial relevancia ante la necesidad imperante de aumentar la eficiencia y aprovechamiento de las capacidades productivas. En concordancia, la norma ISO55000 destaca la importancia crucial de la etapa de planificación en el ciclo de vida del activo, abarcando tanto su operación como su mantenimiento (Marrero et al. 2018).

En la siguiente Figura 25 se muestra una diferenciación de los alcances de planificación de mantenimiento.

Figura 25

Alcances de la planificación de mantenimiento



Nota. Adaptado de Palmer (2019)

García (2018) identifica tres perspectivas distintas en la formulación de planes de mantenimiento: la primera se apoya exclusivamente en las recomendaciones del fabricante, siguiendo los manuales y documentación proporcionados por este; la segunda se fundamenta en la experiencia del equipo técnico y especialista de mantenimiento, proporcionando una aproximación más ajustada a las particularidades operativas y necesidades específicas de la planta; la tercera, en cambio, se basa en el análisis de posibles fallas, requiriendo un profundo conocimiento de los equipos, sistemas y procedimientos involucrados.

La planificación del mantenimiento se ejecuta mediante planteamientos o preguntas para cada tipo de equipo, sistema o máquina, considerando el lugar o contexto de operación de la industria a donde se encuentra el activo físico o equipo, en la siguiente Figura 26 se muestra las preguntas que se hace una persona de planeamiento, un planner de mantenimiento.

Figura 26

Preguntas para el planner de mantenimiento

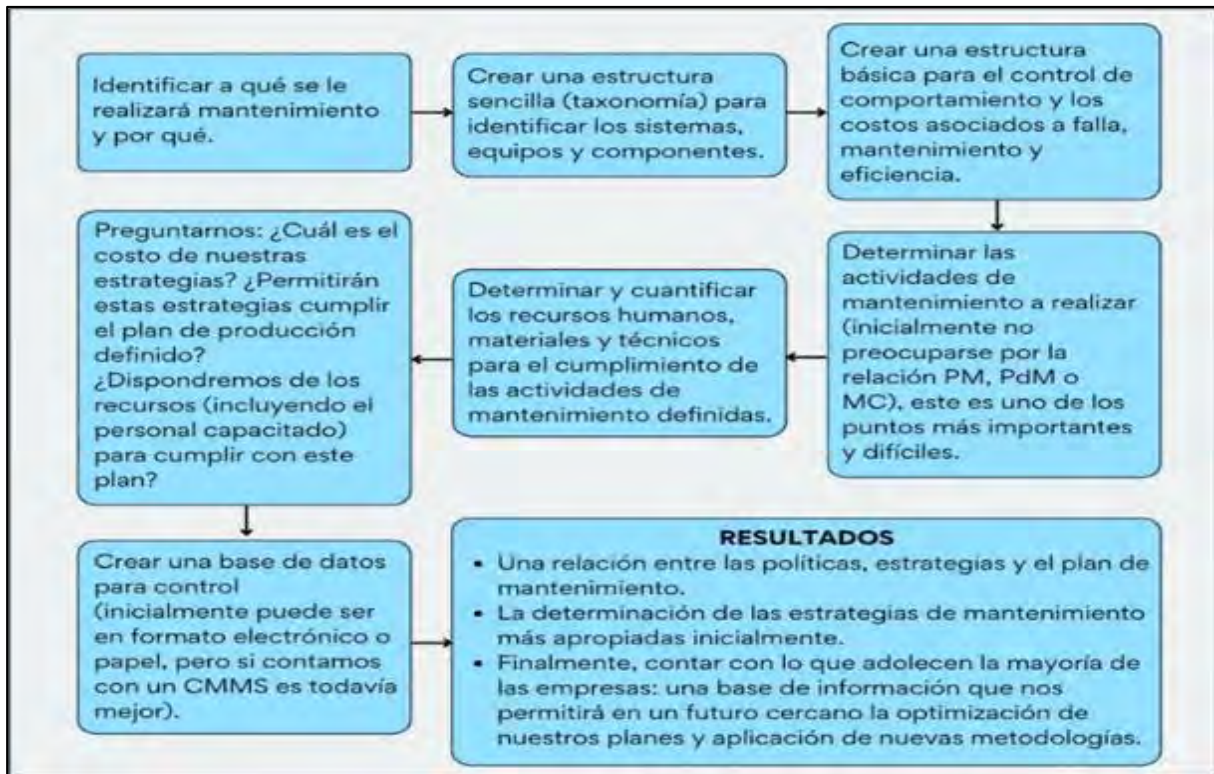


Nota. Adaptado de Palmer (2019)

Ferrera (2022) formula estructuralmente una secuencia para elaborar estratégicamente un plan de mantenimiento, el cual se detalla en la Figura 27.

Figura 27

Secuencia para elaborar un plan de mantenimiento



Nota. Tomado de Ferrera (2022)

Contreras (2020) menciona algunos síntomas de una mala planificación de mantenimiento, que se indican a continuación:

- Que los técnicos comiencen tarde su jornada laboral
- Esperas prolongadas en el almacén para retirar materiales
- Máquinas o equipos no disponibles por operaciones para intervenirle como mantenimiento
- Retrasos por falta de permisos, autorizaciones
- Falta de información técnica para realizar el trabajo
- Viajes al almacén después de iniciar el trabajo
- Espera prolongada para iniciar un nuevo trabajo
- No tener trabajo asignado antes de finalizar la jornada laboral
- Equipos detenidos mucho antes de la llegada del personal de mantenimiento
- Personas inactivas durante la ejecución del trabajo

1.5.1. Sistema Enterprise Resource Planning (ERP) para gestión de mantenimiento

Según Chaparro (2020), los sistemas de información, especialmente los ERP (*Enterprise Resource Planning*, por sus siglas en inglés), son herramientas competitivas y estratégicas para las organizaciones. Su propósito se extiende a la contribución exitosa de los procesos estratégicos de mantenimiento y gestión de activos, permitiendo una planificación, ejecución y seguimiento adecuados de las tareas de mantenimiento. El ERP busca incrementar la productividad, el rendimiento y la efectividad en la toma de decisiones relacionadas con su función principal. Además, en el contexto actual, Chaparro subraya que las áreas de mantenimiento deben adoptar tecnologías de la información, prepararse y mantenerse actualizadas en un entorno caracterizado por la globalización económica y la evolución tecnológica. Por lo tanto, un sistema de información es fundamental en las estrategias de mantenimiento por las siguientes razones:

- Seguimiento de labores de reparación y mantenimiento
- Requerimiento de generar reportes
- Seguimiento de gastos en todas las áreas
- Análisis del enfoque preventivo y correctivo
- Valoración de la eficacia, eficiencia y efectividad
- Requerimiento ineludible de una evaluación holística de la gestión

A la fecha la mayoría de las organizaciones ha implementado un determinado sistema de información, muchos implementaron o implementa un ERP llamado SAP con su módulo PM para la administración y control de la información relacionado a mantenimiento.

De acuerdo con la investigación de Mendoza (2022), SAP constituye un sistema informático diseñado para modelar y automatizar los procesos de gestión empresarial, integrando diversas áreas funcionales y administrando eficientemente los recursos organizativos. La denominación SAP proviene de las siglas alemanas "*Systeme Anwendungen und Produkte*". En el presente, se le reconoce como "*Systems, Applications, Products in Data Processing*".

Chaparro (2020) y Mendoza (2022) coinciden en que el ERP-SAP suministra soluciones de software orientadas a enfrentar los retos del panorama competitivo a nivel mundial. Esto engloba la atención de requisitos vinculados a la innovación tecnológica, la refinación de procesos, la continua exploración de mejoras y el acatamiento de las normativas legales impuestas por las autoridades gubernamentales.

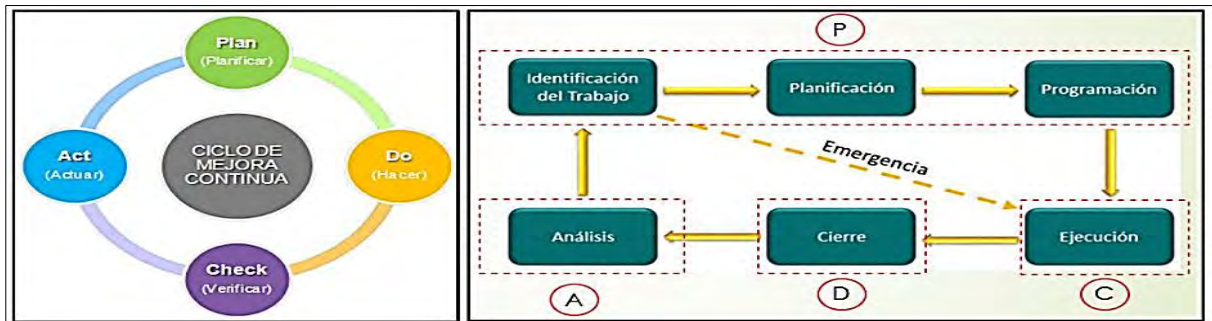
Los distintos Módulos de aplicación se desglosan en diversas esferas especializadas del sistema:

- **Gestión financiera (FI):** Engloba procesos como la gestión del libro mayor, libros auxiliares y ledgers específicos, entre otras funciones contables de alta precisión.
- **Controlling (CO):** Se centra en aspectos como los gastos generales, costos de producto, la cuenta de resultados y centros de beneficio, ofreciendo una perspectiva detallada de la gestión financiera con enfoque analítico.
- **Tesorería (TR):** Supervisa el control de fondos, gestión presupuestaria y otras responsabilidades relacionadas con la administración financiera de manera meticulosa.
- **Sistema de proyectos (PS):** Incorpora elementos como la creación de grafos, contabilidad de costos de proyectos y otras herramientas avanzadas para la gestión estratégica de proyectos.
- **Gestión de personal (HR):** Involucra la gestión integral de recursos humanos, incluyendo el cálculo de la nómina, contratación de personal y otras funciones especializadas.
- **Mantenimiento (PM):** Aborda la planificación detallada de tareas y mantenimiento, asegurando un seguimiento minucioso de las operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo.
- **Gestión de calidad (QM):** Comprende la planificación estratégica de calidad, inspección rigurosa, certificación y avisos de calidad para asegurar estándares superiores en los productos o servicios.
- **Planificación de producto (PP):** Se enfoca en la fabricación sobre pedido, procesos de fabricación en serie y otras actividades especializadas vinculadas a la planificación de productos.
- **Gestión de material (MM):** Supervisa la gestión avanzada de stocks, procesos de compras, verificación exhaustiva de facturas y otras tareas logísticas de alta complejidad.
- **Comercial (SD):** Incluye operaciones especializadas vinculadas a las ventas, expedición, facturación y otras actividades comerciales estratégicas.
- **Workflow (WF):** Agrupa soluciones sectoriales (IS) con funciones aplicables de manera integral a todos los módulos, facilitando la coordinación y optimización de procesos mediante flujos de trabajo especializados.

En términos generales, basándonos en las explicaciones proporcionadas por Mendoza (2022), la Figura 28 ilustra un esquema general de la metodología PDCA (*Plan, Do, Check, Action*) en conjunción con la gestión de mantenimiento y la implementación de SAP PM para la administración de labores de mantenimiento.

Figura 28

Metodología PDCA y SAP PM



Nota. Tomado de Mendoza (2022)

1.5.2. Optimización de planes de mantenimiento preventivo PMO

Tume (2022) explica que PMO, por sus siglas en inglés *Preventive Maintenance Optimization o Planned Maintenance Optimization*, es una estrategia de mantenimiento diseñada para optimizar las necesidades de mantenimiento existentes basándose en el registro de incidencias y la información técnica de los equipos en la organización. La implementación de esta estrategia demanda la experiencia del personal técnico especializado, que determina las tareas emergentes, la frecuencia de intervención y los recursos asignados con el objetivo de potenciar la efectividad del plan de mantenimiento del equipo o sistema, partiendo de los planes y frecuencias de mantenimiento actuales.

El propósito fundamental del PMO es reducir el tiempo de atención a las necesidades de mantenimiento en los equipos y máquinas para incrementar su confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Para lograr esto, se requiere administrar y controlar una cantidad significativa de información mediante la recolección de datos de campo y el análisis de modos y efectos de falla a nivel funcional con sus respectivos impactos (Ponce, 2018). Además, según Maldonado (2019), el PMO se dedica a la eficiente manipulación y análisis estadístico de datos históricos hasta la fecha actual, permitiendo la ejecución efectiva de mantenimientos preventivos y predictivos con el respaldo multidisciplinario del personal de mantenimiento de manera sistematizada y centralizada, analizando los modos y efectos de falla relevantes.

Ponce (2018) y Maldonado (2019) sugieren que el PMO debe implementarse inicialmente en los equipos y sistemas críticos de la planta, aquellos con un mayor impacto productivo y continuidad operacional, mediante un análisis y estudio de criticidad. Para ello, indican que, según Steve Turner, el PMO se desarrolla siguiendo nueve pasos:

- Definir roles y responsabilidades.
- Examinar los posibles fallos.
- Optimizar y revisar el análisis de fallos, así como los procedimientos asociados.

- Realizar un análisis funcional respaldado en la confiabilidad.
- Valorar las implicaciones.
- Establecer y especificar las directrices de mantenimiento.
- Agrupar y evaluar los procedimientos operativos.
- Validar e implementar los programas y planes de mantenimiento.
- Dinamizar el programa de vida y mejora continua de manera dinámica.

Según Maldonado (2019), el PMO es más eficiente y rápido que el RCM, principalmente porque optimiza el proceso de análisis de modos y efectos de falla a nivel integral para un equipo o máquina específica, sin considerar el análisis de las funciones cuya pérdida es consecuencia de alguna falla. En contraste, el RCM examina detalladamente cada una de las fallas y sus efectos que pueden ocurrir en un equipo o máquina. Maldonado estima una pérdida de tiempo del 30% en el RCM en comparación con el PMO. La Figura 29 resume estas diferencias.

Figura 29

Diferencias entre el PMO y RCM



Nota. Tomado de Maldonado (2019)

Al igual que el RCM, el PMO se respalda en su principal herramienta, que es el AMEF (Análisis de Modos y Efectos de Falla). Este método representa una forma estructurada y sistemática de identificar las funciones del equipo o máquina. Posteriormente, se analizan o identifican los modos de falla y sus efectos potenciales tanto en el diseño como en el funcionamiento del equipo o sistema. Finalmente, se proponen o formulan acciones dirigidas a reducir o eliminar la probable falla y sus efectos, con el objetivo de garantizar que el equipo o máquina continúe funcionando sin interrupciones en la secuencia productiva.

En la siguiente Figura 30 se muestra una plantilla y/o ruta básica de cómo desarrollar el AMEF.

Figura 30

Enfoque de siete pasos AMEF



Nota. Tomado <https://acmplean.com/el-manual-del-amfe-se-renueva/>

1.6. Tecnología de la Industria 4.0

La Industria 4.0 se puede definir como una innovación tecnológica que busca la automatización inteligente de todos los procesos productivos en una organización, abarcando empresas de todos los sectores industriales. La digitalización, el internet y la comunicación (hiperconectividad) son elementos cruciales para implementar la Industria 4.0, permitiendo la interacción entre máquinas y equipos, así como entre estas y los seres humanos. Esto se hace con la expectativa de que el diseño, la fabricación, la operación y el servicio en una cadena de valor experimenten una transformación orientada hacia la optimización de la complejidad en los procesos de producción, la integración y la interacción, además de mejorar la gestión de activos y, en última instancia, lograr un mayor control del ciclo de vida de los activos (Peñata, Bolaños, Chimbi, 2021). En la siguiente Figura 31 se muestra en forma de imágenes los componentes y/o herramientas de la tecnología industria 4.0.

Figura 31

Tecnología industria 4.0



Nota. Tomado de Gonzales (2019)

González (2019) presenta 6 principios o características que describen las herramientas habilitadoras a la tecnología industria 4.0.

- **Descentralización:** Capacidad de diseño de procesos y subprocesos autónomos con equipamiento para tomar decisiones.
- **Analítica en tiempo real:** Habilidad para recolectar y analizar extensos conjuntos de datos (*Big Data*) provenientes del terreno, posibilitando el monitoreo y gestión del estado operativo de los equipos y la mejora de procesos. Esto facilita la detección inmediata de desviaciones en la funcionalidad y posibles fallos.
- **Interoperabilidad:** Capacidad de comunicación y control del funcionamiento de los equipos, robots, sistemas de información y personas desde cualquier lugar del mundo.
- **Virtualización:** Capacidad de generar y disponer copia virtual de los procesos y la operación de una máquina o equipo, mediante el modelamiento y simulación de los procesos industriales.
- **Modularidad y escalabilidad:** Capacidad de ser flexible y adaptable a las necesidades de la planta y los equipos, así como a lo largo de toda la cadena de valor, es esencial. Además, es fundamental contar con la factibilidad de escalar su aplicación a todos los procesos del negocio.
- **Orientación al servicio:** La habilidad de transformar el valor recién generado en los procesos de la planta y ofrecerlo al cliente mediante servicios mejorados o cambios innovadores.

1.7. Estado del Arte

En los últimos años, se ha evidenciado en gran medida la proliferación de las herramientas de la Tecnología Industria 4.0. En 2018, se ejecutó un estudio conocido como el "Índice de Preparación Digital (DRI)" en América Latina. La investigación tenía como objetivo medir la disposición de los países de la región para la digitalización de las organizaciones, considerando 7 elementos clave: infraestructura en el ámbito digital, adopción de tecnología, capital humano, necesidades básicas, facilidad para hacer negocios, inversión del gobierno y negocio y emprendimiento (Gonzalez, 2019). La tabla 1 muestra los resultados de este estudio, se refleja el nivel de competitividad de los países latinoamericanos en términos de preparación digital.

Tabla 1

Preparación de transformación digital en Latinoamérica

País	Cuartilla	Categoría AAA	Puntuación de preparación digital
Uruguay	Medio-alto	Acelerar	14.07
Chile	Medio-alto	Acelerar	13.92
Costa Rica	Medio-alto	Acelerar	13.89
Panamá	Medio-alto	Acelerar	13.41
México	Medio-alto	Acelerar	13.11
Puerto Rico	Medio-bajo	Acelerar	12.95
Colombia	Medio-bajo	Acelerar	12.88
Argentina	Medio-bajo	Acelerar	12.53
Perú	Medio-bajo	Acelerar	11.97
Brasil	Medio-bajo	Acelerar	11.80
El Salvador	Medio-bajo	Acelerar	11.57
Ecuador	Medio-bajo	Acelerar	11.33
República Dominicana	Medio-bajo	Acelerar	10.93
Guatemala	Medio-bajo	Acelerar	10.80
Paraguay	Medio-bajo	Acelerar	10.74
Honduras	Medio-bajo	Acelerar	10.58

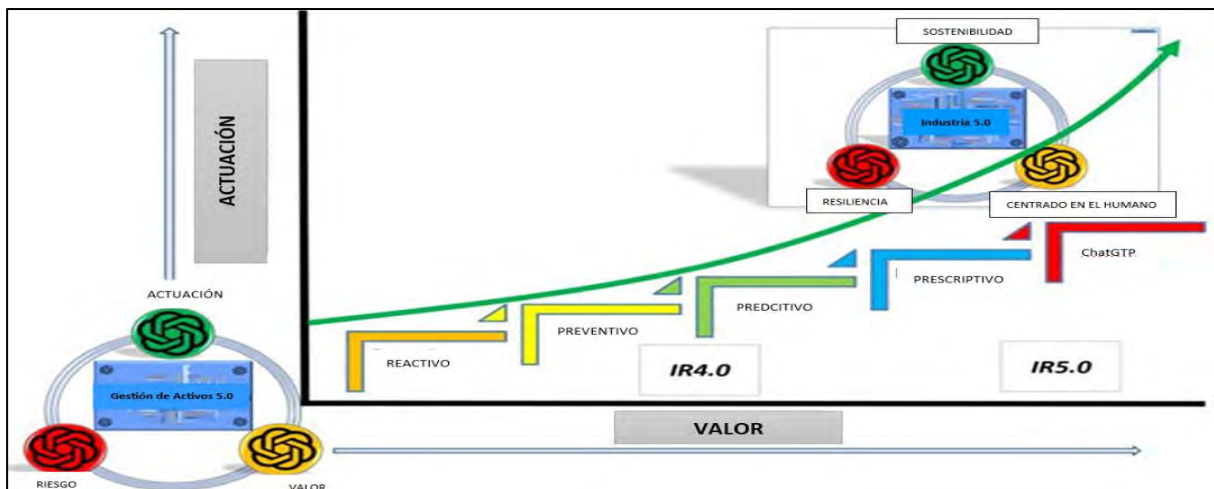
País	Cuartilla	Categoría AAA	Puntuación de preparación digital
Nicaragua	Medio-bajo	Activar	10.03
Bolivia	Medio-bajo	Activar	9.88
Haití	Bajo	Activar	7.49
Promedio de preparación digital latinoamericana			11.78

Nota. Tomado de González (2019)

En uno de sus estudios y análisis, la empresa SSAM (2023) proyecta la implementación a mediano plazo de *Digital Twins* o "Gemelos Digitales" con un nivel de inteligencia avanzado, lo que representa un avance hacia la Industria 5.0. En esta proyección, se destaca un mayor énfasis el empleo de la inteligencia artificial, particularmente después de una evaluación prescriptiva de las operaciones de mantenimiento de equipos. En la Figura 32 se ilustra la tendencia del mantenimiento a la escala tecnológica, considerando tanto las líneas de la Industria 4.0 como la digitalización.

Figura 32

Tendencia del Mantenimiento a Industria 5.0

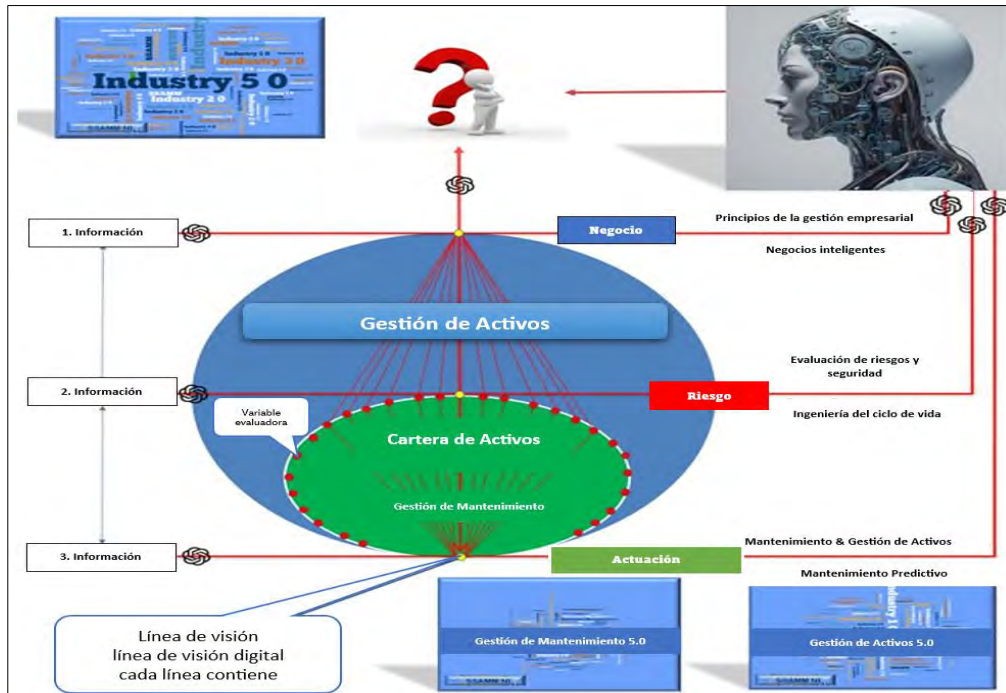


Nota. Tomado de SSAM (2023)

La Figura 33 Se expone una representación visual de la evolución de la gestión de activos y mantenimiento bajo el contexto netamente tecnológico digital inteligente, en donde se resalta la existencia de robots para la atención de todos los procesos de mantenimiento con la ayuda de la tecnología de Gemelo Digital.

Figura 33

Gestión de mantenimiento hacia la robotización o inteligencia artificial



Nota. Tomado de SSAM (2023)

La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), por medio de *Centrum Think*, presentó un estudio de ranking de competitividad digital mundial (ver la tabla 2).

Tabla 2

Ranking mundial de digitalización al 2022

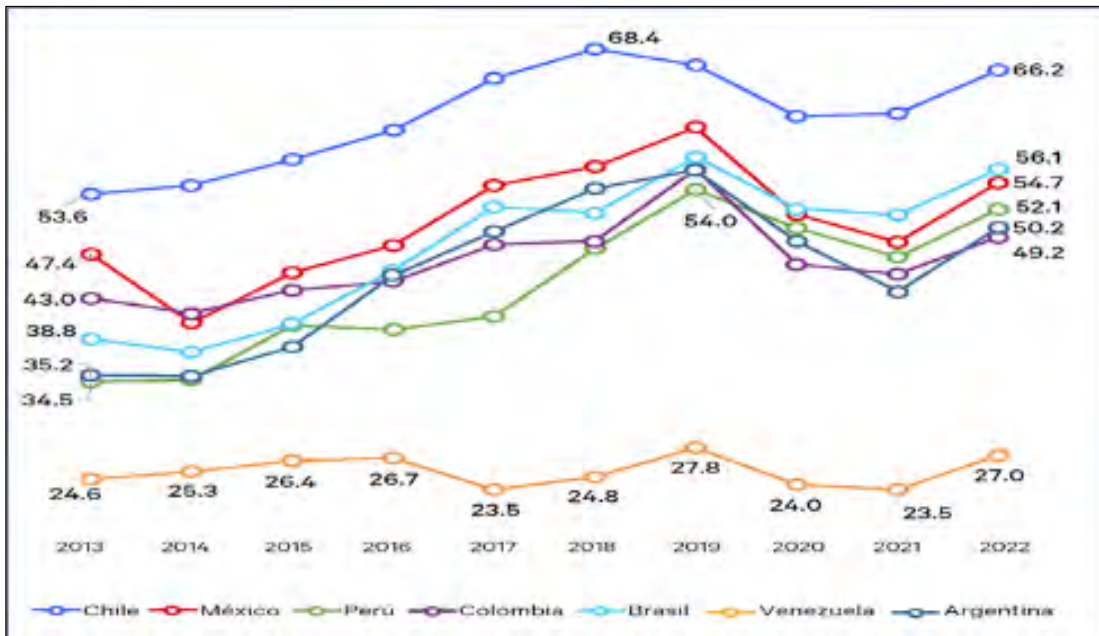
RANKING MUNDIAL DE COMPETITIVIDAD DIGITAL 2022																										
País	Puntaje					Cambio 22/21		País	Puntaje					Cambio 22/21												
	2022	2021	2020	2019	2018	Ptje.	Pos.		2022	2021	2020	2019	2018	2017	Ptje.	Pos.										
(1) Dinamarca	100.0	95.2	96.0	95.2	96.8	94.5	4.8	3	(23) Bélgica	81.3	75.3	77.0	82.5	82.2	80.8	6.1	3	(45) Chipre	63.7	59.4	61.7	59.5	54.9	53.5	4.3	-2
(2) Estados Unidos	99.8	100.0	100.0	100.0	95.4	-0.2	-1	(24) Irlanda	79.6	79.2	79.2	85.9	84.3	82.9	0.4	-5	(46) Polonia	63.1	60.9	69.2	73.7	68.6	65.9	2.1	-5	
(3) Suecia	99.8	95.2	95.1	96.1	97.5	95.9	4.6	0	(25) Lituania	79.3	70.3	72.9	77.6	76.1	75.0	9.0	5	(47) Eslovaquia	59.6	54.2	53.3	62.6	56.5	59.3	5.4	0
(4) Singapur	99.5	95.1	98.1	99.4	99.4	100.0	4.3	1	(26) Catar	78.4	70.5	71.6	75.9	78.9	76.1	7.9	3	(48) Bulgaria	58.5	50.8	56.3	63.7	59.0	56.8	7.7	4
(5) Suiza	98.2	94.9	93.7	94.6	95.9	92.0	3.3	1	(27) Nueva Zelanda	77.4	77.1	77.7	86.0	84.5	85.2	0.3	-4	(49) Rumania	58.3	52.0	53.7	62.8	57.1	52.5	6.3	1
(6) Países Bajos	97.8	93.3	92.6	94.3	93.9	93.2	4.5	1	(28) España	77.4	68.2	69.0	78.7	74.3	72.1	9.2	3	(50) Grecia	56.9	55.6	56.2	59.6	56.3	54.4	1.3	-6
(7) Finlandia	96.6	90.1	91.1	93.7	95.2	95.0	6.5	4	(29) Japón	76.8	73.0	75.1	82.8	82.2	78.1	3.8	-1	(51) Indonesia	56.7	50.1	50.1	58.0	45.8	44.2	6.6	2
(8) Corea del Sur	95.2	89.7	92.3	91.3	88.0	83.0	5.5	4	(30) Luxemburgo	76.5	77.4	73.3	84.4	81.5	82.9	-0.9	-8	(52) Brasil	56.1	51.5	52.1	57.3	51.7	52.3	4.7	-1
(9) Hong Kong	94.4	96.6	94.5	93.7	93.1	92.1	-2.2	-7	(31) Malasia	76.4	73.3	76.0	82.4	80.6	79.9	3.1	-4	(53) Jordania	56.0	52.5	51.8	60.4	57.2	51.0	3.5	-4
(10) Canadá	94.2	87.3	90.5	90.8	95.2	91.7	6.8	3	(32) Baréin	75.9	-	-	-	-	-	-	-	(54) Turquía	55.0	52.8	59.8	59.8	56.4	53.9	2.2	-6
(11) Taiwán	94.1	92.2	90.8	90.2	86.2	87.6	1.9	-3	(33) República Checa	75.5	65.2	67.5	71.8	71.5	70.6	10.3	0	(55) México	54.7	48.7	51.5	60.4	56.4	54.5	6.0	1
(12) Noruega	93.2	91.3	92.2	93.7	95.7	90.8	1.9	-3	(34) Lituania	74.2	63.9	65.5	72.4	69.2	67.7	10.4	3	(56) Filipinas	52.8	47.2	50.0	59.4	53.4	55.9	5.7	2
(13) Emiratos Árabes Unidos	91.4	90.5	86.0	90.3	86.2	83.1	0.9	-3	(35) Arabia Saudita	73.9	64.3	67.9	69.0	61.9	66.1	9.5	5	(57) Perú	52.1	47.2	50.1	54.0	48.1	41.1	4.8	0
(14) Australia	87.9	78.7	85.5	88.9	90.2	85.0	9.2	6	(36) Kazajistán	73.0	66.1	66.5	72.6	65.5	65.7	7.0	-4	(58) Sudáfrica	51.2	43.6	48.4	60.9	56.9	55.7	7.6	2
(15) Israel	87.4	79.6	80.7	86.4	92.9	86.7	7.8	2	(37) Eslovenia	71.4	65.0	69.5	75.2	71.4	68.7	6.5	-2	(59) Argentina	50.2	43.6	48.8	56.0	54.2	49.8	6.6	2
(16) Reino Unido	86.4	85.8	86.3	88.7	93.2	88.9	0.6	-2	(38) Portugal	70.8	65.2	66.5	73.0	73.4	69.7	5.7	-4	(60) Colombia	49.2	45.5	46.5	56.1	48.8	48.5	3.8	-1
(17) China	86.4	84.4	84.1	84.3	74.8	71.5	2.0	-2	(39) Italia	68.3	61.8	60.9	67.9	65.0	65.5	6.6	1	(61) Botswana	48.3	33.0	-	-	-	15.2	2	
(18) Austria	85.4	80.9	83.1	84.5	86.8	84.1	4.5	-2	(40) Tailandia	68.2	63.2	64.3	68.4	65.3	63.8	5.0	-2	(62) Mongolia	45.2	40.7	43.7	49.8	48.1	41.1	4.6	0
(19) Alemania	85.2	79.3	81.1	86.2	85.4	84.1	5.8	-1	(41) Chile	66.2	61.8	61.5	66.7	68.4	65.4	4.4	-2	(63) Venezuela	27.0	23.5	24.0	27.8	24.8	23.5	3.5	1
(20) Estonia	85.1	75.4	78.0	78.7	80.8	78.5	9.6	5	(42) Hungría	65.2	55.2	55.9	65.5	57.1	58.5	10.0	3									
(21) Islandia	85.0	77.6	77.1	79.9	82.7	80.5	7.4	0	(43) Croacia	64.6	49.8	52.0	60.0	57.5	54.8	14.8	12									
(22) Francia	81.4	75.7	77.0	82.5	80.8	78.8	5.8	2	(44) India	63.9	55.1	54.8	65.0	57.1	54.4	8.8	2									

Nota. Tomado de Marquina (2022)

Así mismo presentó un estudio de ranking de competitividad digital mundial a nivel de países latinoamericanos el cual se expone en la Figura 34.

Figura 34

Tendencia a la digitalización de Latinoamérica del 2013-2022

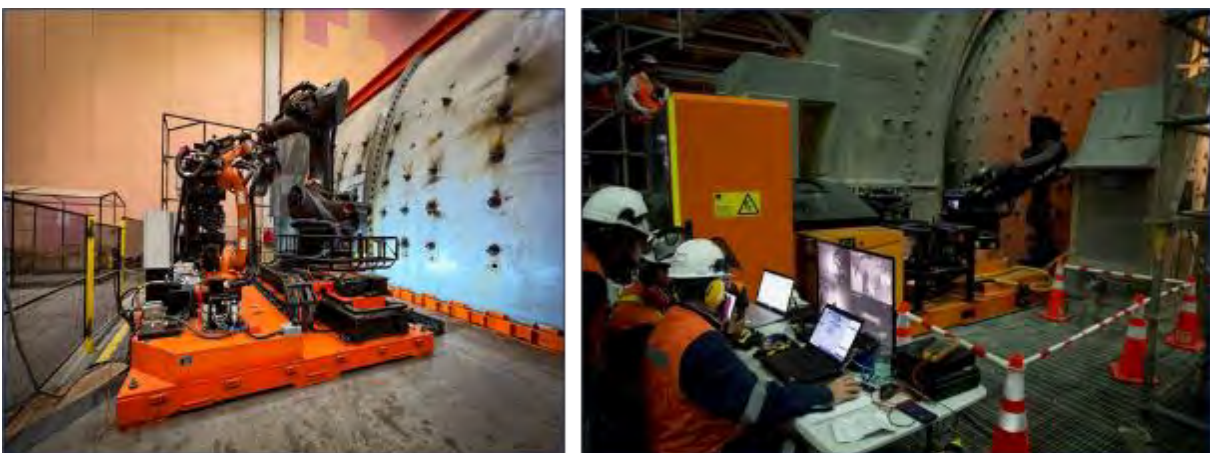


Nota. Tomado de Marquina (2022)

La industria minera chilena está experimentando un progreso notable, como se refleja en el ranking. De hecho, ya se están llevando a cabo cambios de liners (piezas de desgaste) en los molinos mediante la utilización de brazos robóticos (ver figura 35), lo que ha resultado en ahorros significativos en lo que respecta a los gastos relacionados con el trabajo humano.

Figura 35

Aplicación de brazos robots en cambio de liners en molinos

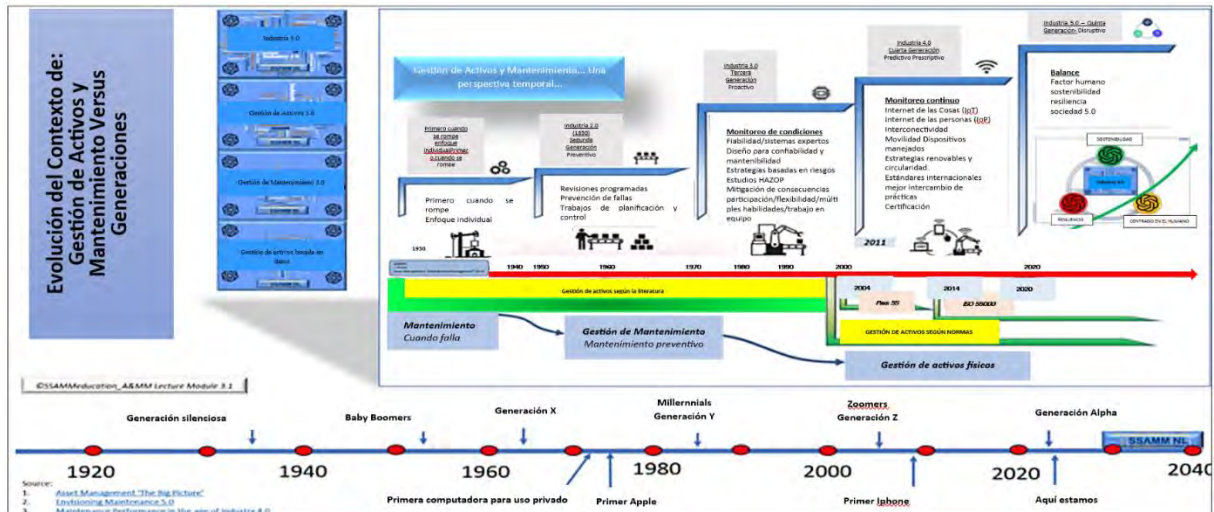


Nota. Tomado de Marfán, M., Meller, P. (2019)

En la Figura 36 se evidencia la progresión de la industria y las transformaciones en la gestión de activos y mantenimiento en una secuencia temporal, destacando los avances tecnológicos continuos. La empresa SSAM (2023) exhibe una representación visual que abarca desde las distintas revoluciones industriales hasta las generaciones de la población atendidas en cada fase de transformación.

Figura 36

Línea de tiempo de la evolución industrial



Nota. Tomado de SSAM (2023)

1.8. Desarrollo histórico de la Industria 4.0

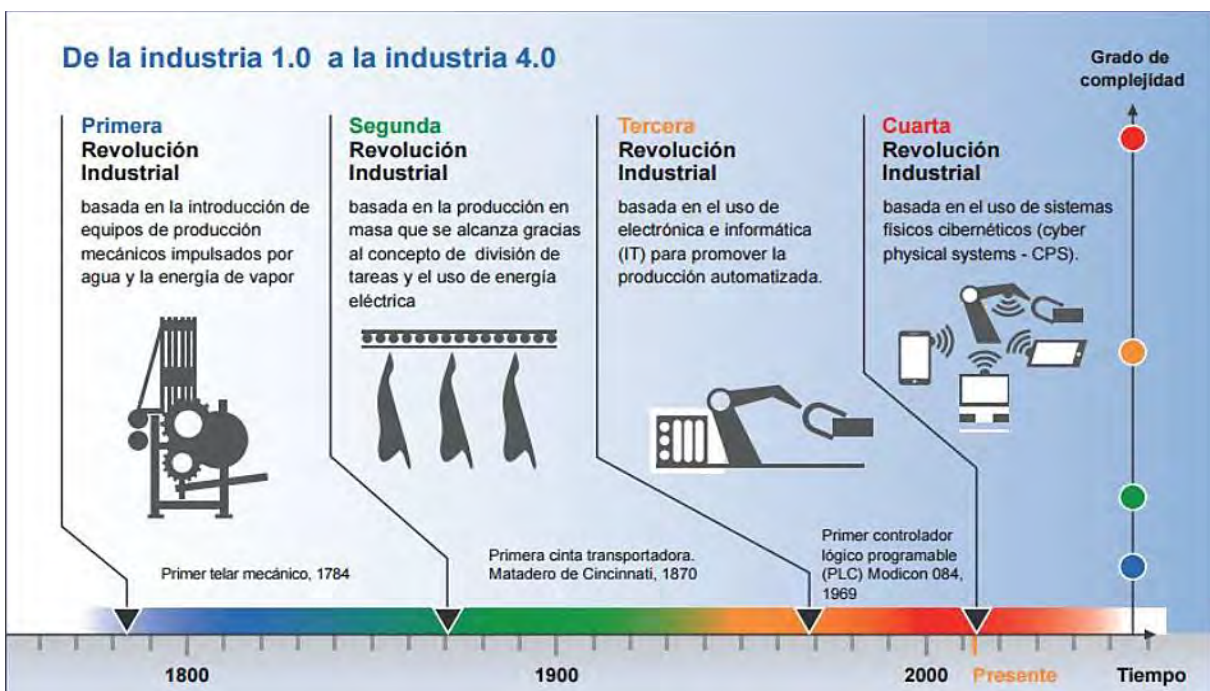
La expresión "Industria 4.0" proviene de Alemania y fue presentado por primera vez por Henning Kagermann, presidente de AcaTech, la Academia Alemana de Ciencias e Ingeniería, en 2011. Esta presentación se llevó a cabo durante la feria tecnológica de Hannover y marcó el inicio de una nueva visión respaldada por el gobierno alemán. Esta visión abogaba por la interconexión de todos los procesos y equipos industriales a través de Internet. La Industria 4.0 constituye un novedoso enfoque en la organización y supervisión de la cadena de valor, abarcando la totalidad del ciclo de vida del producto y expandiéndose por los sistemas de fabricación. Este paradigma es factible y se realiza gracias a los avances informáticos Gonzalez (2019).

La denominación "Industria 4.0" se ha popularizado en toda Europa, aunque se originó en Alemania. Además, es común hacer referencia a este concepto utilizando términos como "Fábrica Inteligente" o "Internet Industrial". En esencia, la Industria 4.0 representa la aplicación del modelo "Internet de las Cosas" (IoT) a la industria. Cada una de estas expresiones comparten la aceptación de que los procesos de fabricación están experimentando una transformación digital, lo que se podría describir como una "revolución industrial" impulsada por los avances en tecnologías de la información, especialmente en informática y software (Val Roman, 2018).

Esta cuarta revolución industrial tiene como propósito la transformación integral de todos los procesos mediante la inclusión y fusión de tecnologías digitales. Sus objetivos son optimizar los tiempos en los procesos productivos, mejorar la eficiencia y confiabilidad de la operación de los equipos, proporcionar a toda la organización la flexibilidad y trazabilidad necesarias en la cadena de valor, desarrollar un mantenimiento efectivo y reducir costos en la gestión de activos físicos y a lo largo del ciclo de vida de estos. (Gonzalez, 2019). En la Figura 37. se muestra en una línea de tiempo el surgimiento y evolución de esta revolución industrial: tecnología “Industria 4.0”.

Figura 37

Línea de tiempo hacia la cuarta revolución industrial



Nota. Tomado de Val Roman (2018)

1.9. Herramientas que comprenden la Industria 4.0

Los recursos tecnológicos digitales que permiten la implementación y desarrollo de industria 4.0 en las plantas, fábricas, equipos, sistemas de producción, comunicación y automatización son:

- *Big Data*
- Realidad aumentada
- Realidad virtual
- Computación en la nube
- Robots autónomos

- Simulaciones
- Integraciones de sistemas
- Internet de las cosas
- *Machine Learning*
- Ciberseguridad
- Fabricación aditiva - impresión 3D

A continuación, se desarrolla la definición y características de los recursos de la industria 4.0 que serán adoptados para la puesta en práctica del presente estudio.

1.9.1 Big Data

Peñata, Bolaños y Chimbi (2021) coinciden que: *Big Data* es la ciencia que se encarga del análisis, administración y control de gran cantidad de datos de forma inteligente mediante modelos de descripción, predicción y optimización; para luego, de forma efectiva tomar decisiones en el corto tiempo posible. Así mismo indican que *Big Data* ayuda a la integración de sistemas aislados de los procesos productivos, automatiza la recopilación de datos y el análisis correspondiente para un mejor entendimiento de los sistemas o equipos. Por último, mediante la interconexión de sistemas y equipos se logra máquinas inteligentes que pueden tomar decisiones.

Cuando se menciona el término *Big Data*, se está haciendo alusión a agrupaciones de información o amalgamas de conjuntos de datos que, debido a su magnitud, complejidad, variabilidad y ritmo de expansión, presentan desafíos en su adquisición y procesamiento mediante dispositivos, herramientas o tecnologías usuales, tales como las bases de datos estadísticas. La complejidad inherente al *Big Data* se origina principalmente debido a la falta de estructuración en una considerable cantidad de información producida por las tecnologías contemporáneas. Esto engloba datos provenientes de diversas fuentes tales como registros web, identificación mediante radiofrecuencia (RFID), sensores integrados en dispositivos, maquinaria, vehículos, búsquedas en la red, plataformas sociales como Facebook, laptops, teléfonos avanzados y otros dispositivos móviles, GPS y registros de centros de atención telefónica. La utilización de *Big Data* debe ser combinado con datos estructurados o base de datos racionales como un Sistema de planificación de recursos empresariales (ERP) o un sistema computarizado de gestión de mantenimiento (CMMS) (Díaz, 2020).

El papel esencial de *Big Data* en el ámbito del Internet de las cosas (IoT) es significativo, siendo considerado como su principal impulsor. En este escenario, todos los datos e información recabados por los sensores ubicados en el campo, equipos o máquinas convergen y se centralizan en la plataforma de *Big Data*. Esta plataforma no solo actúa como un repositorio, sino que también despliega una función crítica al clasificar, procesar y derivar conclusiones o decisiones que optimizan procesos, perfeccionan la logística, eliminan

restricciones y realizan predicciones y prescripciones en el ámbito del mantenimiento. Es por esta razón que las empresas se ven intrínsecamente compelidas a implementar estratégicamente *Big Data* como el elemento clave para alcanzar sus objetivos de éxito en el entorno digital de la Industria 4.0 (Peñata, Bolaños y Chimbi, 2021).

Díaz (2020) destaca la trascendental función de la implementación del *Big Data* en las organizaciones al descifrar enigmas latentes en su información almacenada, incluso aquellos que las empresas desconocían. Al tener la capacidad de manejar volúmenes masivos de datos, el *Big Data* facultad a las empresas para realizar complejas simulaciones y pruebas, brindando así un punto de referencia excepcional. Esto habilita a las entidades a discernir de forma más clara las problemáticas presentes. De acuerdo con Díaz (2020), La recolección de extensas cantidades de datos y el discernimiento de patrones en ellos facultan a las empresas para desplazarse con celeridad, sin contratiempos y de forma eficaz, lo que a su vez hace que el negocio sea más inteligente.

En la Figura 38 se representa la secuencia evolutiva de la información en el contexto del *Big Data*.

Figura 38

Ciclo de datos en Big Data



Nota. Tomado de González (2021)

La utilización y/o procesamiento de datos con *Big Data* tiene una secuencia, una estructura encaminada hacia la automatización de un proceso o funcionamiento de algún equipo o un sistema, en la Figura 39 se expone la diferenciación de la utilización de datos e información a nivel manual, realizado por el hombre y por otro lado lo realizado por *Big Data*, verificándose que la única forma de llegar a la automatización es con el uso de datos e información hasta un nivel cognitivo.

Figura 39

Diferenciación de utilización de datos en forma manual y Big Data



Nota. Tomado de González (2021)

Para el enfoque del mantenimiento y gestión de activos físicos en la utilización de *Big Data* se toma la premisa “si analizas datos puedes evitar fallas”, ya que con los datos e información centralizados, clasificados, calculados y analizados se puede evitar que las máquinas o equipos paren ante la causa de una falla. En la Figura 40 se evidencia que los datos e información en *Big Data* tienen el poder de describir la funcionalidad de un equipo o máquina, diagnosticar, predecir y prescribir alguna potencial falla o falla funcional.

Figura 40

Big Data y el marco de análisis de falla



Nota. Tomado de González (2021)

1.9.2 Internet de las cosas (IoT)

Gonzalez (2019) indica que el término internet de las cosas por su terminología en inglés *Internt of Things*, IoT, fue creado por Kevin Ashton y presentado en 1998 en la empresa *Procter & Gamble* con la siguiente afirmación: Al fusionar tecnologías avanzadas, como la identificación por radiofrecuencia y una variedad de sensores, en objetos de uso diario, se gestará un Internet de las Cosas de última generación. Este hito marcará el comienzo de una revolución en la comprensión, adaptación y respuesta de las máquinas en una era tecnológica

sin igual, así mismo infiere que el IoT es una arquitectura emergente de la revolución informática y las comunicaciones que permite interactuar con las cosas, objetos, máquinas y/o equipos y sistemas a través del internet y sensores (sensorización de las cosas) con sus controladores, beneficiando la optimización de la gestión, monitoreo de los activos a través de mayor cantidad de datos e información.

El Internet Industrial de las Cosas (IIoT) se refiere a la interacción y el control de dispositivos tanto dentro como fuera de la industria. Esta red abierta permite la interoperabilidad de procesos inteligentes autónomos con objetos virtuales que son independientes, pero a la vez comparten objetivos comunes. A través de la comunicación por Internet, se generan oportunidades para la refinación continua y la ejecución de elecciones personalizadas en tiempo real durante el desarrollo productivo. La interconexión a través de Internet se logra utilizando el Protocolo de Internet (IP), que asigna una dirección única a cada equipo u objeto en la industria. Esto permite una comunicación conforme a estándares y normas tecnológicas (Peñata, Bolaños, Chimbí, 2021).

De acuerdo con Gonzalez (2019) las principales tecnologías auxiliares que hacen posible el IoT o IIoT son:

- **Dispositivos electrónicos RFID:** permiten la identificación automática sin tener contacto con las cosas, significa Identificación mediante radiofrecuencia por sus siglas en inglés *Radio Frequency Identification*, a través de etiquetas, lectores y antenas en los objetos para tener comunicación por internet.
- **Sensores:** Permiten la recopilación de datos del estado en campo de las cosas o equipos, para luego ser transformados a información, gracias a los avances de nanotecnología y la miniaturización se tiene sensores y microprocesadores de tamaños muy pequeños que pueden conectarse o comunicarse mediante internet para obtener datos e información a tiempo real.
- **Nanotecnología y tecnología inteligentes:** Permite que los objetos o cosas interactúen e interconectan unos con otros a través del internet por muy pequeños que sean, controlándose unos a otros con el procesamiento inteligente de señales que recibe o se emiten unos a otros mediante un sistema de control en base a un conocimiento a priori.

1.9.3 Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL)

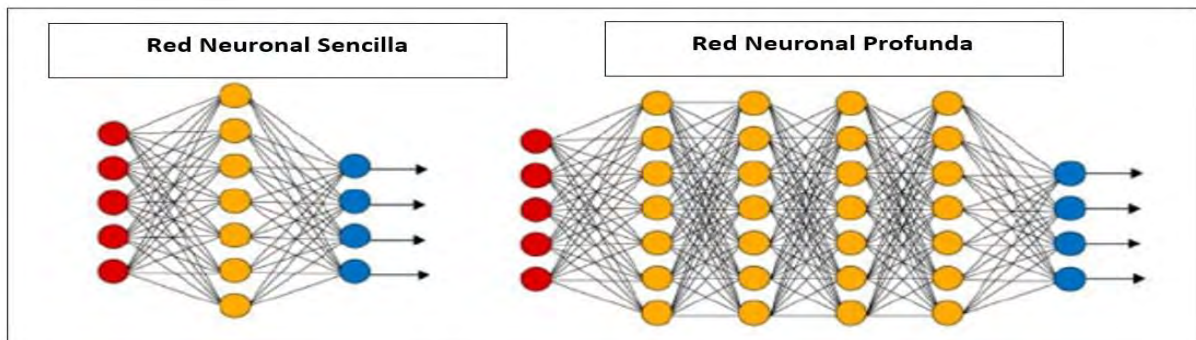
Machine Learning también llamado aprendizaje automático de las máquinas, es la ciencia de la capacidad que tiene una inteligencia artificial, un software o un robot para aprender por sí mismo, este aprendizaje puede ser supervisado o no supervisado, es decir que el aprendizaje supervisado es cuando interviene un humano quien le dice qué hacer, diferenciar entre la acción mala y acción buena, y en el no supervisado es la propia inteligencia artificial que aprende a diferenciar lo que hace bien y lo que hace mal, su uso común es en

asistentes virtuales, detección de fraudes, diagnóstico de enfermedades, video juegos entre otros (Díaz, 2020).

Según Cabeza (2018), el proceso de aprendizaje automático o *Machine Learning*, se basa en la programación de algoritmos condicionales que las máquinas deben leer o aplicar cuando se encuentren con datos adecuados o dentro del rango de posibilidades definido por el algoritmo (software). Estas máquinas tienen la capacidad de adaptarse y generar nuevas reglas para mejorar su precisión, lo que puede compararse con una red neuronal simple. Por otro lado, Cabeza también menciona que el Aprendizaje Profundo, o *Deep Learning*, es un algoritmo mucho más complejo que busca imitar el funcionamiento del cerebro humano. Puede considerarse como una ampliación de la red neuronal simple, con múltiples capas que procesan información y producen resultados en forma de ponderaciones. Las ponderaciones de cada capa se utilizan para análisis más profundos, lo que implica combinaciones de ponderaciones que reducen el margen de error y generan resultados de manera autónoma. En la Figura 41 se representa una diferencia visual entre algoritmos de *Machine Learning* y *Deep Learning*.

Figura 41

Comparación red neuronal simple y deep learning



Nota. Tomado de Cabeza (2018)

Brand (2023) resalta que el proceso de toma de decisiones de mantenimiento ha cambiado, ya que existen algoritmos de aprendizaje automático, que están permitiendo optimizar y mejorar los tiempos y formas de atención a los equipos o máquinas, indicando los siguientes beneficios:

- **En mantenimiento predictivo:** Los modelos de ML analizan datos históricos de sensores y equipos para predecir cuándo es necesario el mantenimiento, prevé fallas y reduce tiempo de inoperatividad.
- **En predicción de fallas:** ML puede predecir fallas potenciales y funcionales, permitiendo mantenimiento proactivo.

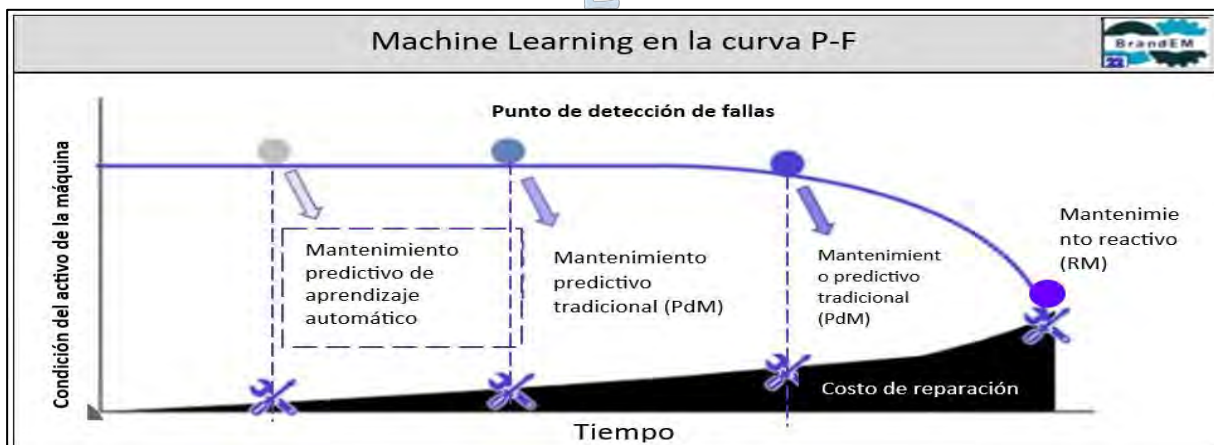
- **Optimización de repuestos:** ML optimiza el inventario de repuestos al pronosticar qué repuestos es más probable que se necesiten, lo que reduce los costos de almacenamiento.
- **Automatización del flujo de trabajo:** ML puede automatizar los flujos de trabajo de las operaciones vinculadas a la gestión del mantenimiento. priorizando tareas y asignando recursos de manera eficiente.
- **Análisis de causa raíz (ACR):** ML ayuda a identificar las causas fundamentales de las fallas de los equipos, ACR automatizado a través de patrones de fallas, permitiendo generar acciones de mantenimiento específicas.
- **Toma de decisiones fundamentada en el análisis de datos:** ML proporciona información basada en datos que facilita la adopción de decisiones más informadas y asignación de recursos.
- **Reducción de costos y mejora continua:** al concretarse los puntos anteriores ML impacta en la reducción de costos, ya que los equipos estarán más disponibles u operativos, mayor desempeño en confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad con ahorro de costos, así mismo ML aprenderá en el tiempo para mejorar su precisión y eficacia.

En resumen, el aprendizaje automático Optimiza la dinámica de la toma de decisiones de mantenimiento al proporcionar información, predicciones y automatización que mejoran la eficiencia, reducen los costos y aumentan la confiabilidad general de la maquinaria y el equipo.

En la Figura 42 se muestra una curva PF generado por Brand (2023) en donde se muestra en qué punto de la falla está trabajando ML.

Figura 42

Curva P-F con Machine Learning

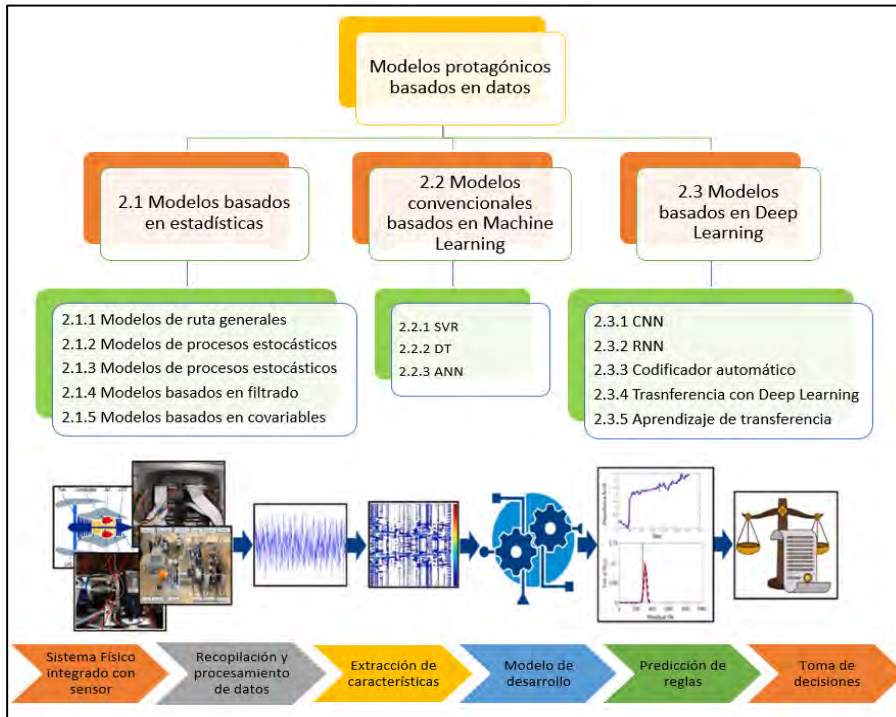


Nota. Adaptado de Brand 2023

Así mismo en la siguiente Figura 43 se ofrece un esquema visual de una estructura y secuencia de procesamiento de información por *Machine Learning* para un modelo de pronóstico en la atención de equipos o máquinas.

Figura 43

Estructura y secuencia de procesamiento de información por ML



Nota. Adaptado de <https://images.app.goo.gl/dhVZyx3aiiapuv1R7>

1.9.4 Base de datos en la Nube – Cloud Computing

Cloud computing también conocida como computación en la nube, consiste en una tecnología que posibilita la entrada y empleo de todas las aplicaciones, software y programas especializados para cada tipo de máquina desde cualquier ubicación del mundo, prescindiendo de la necesidad de contar con servidores informáticos propios, impactando muy positivamente en temas de costos de instalación, mantenimiento y actualización de servidores informáticos, por lo tanto es una tecnología clave para la sustentación o sostenimiento de las demás tecnologías de industria 4.0 (Cabeza, 2018).

Destacan seis aspectos o beneficios claves para la utilización de *Cloud Computing*:

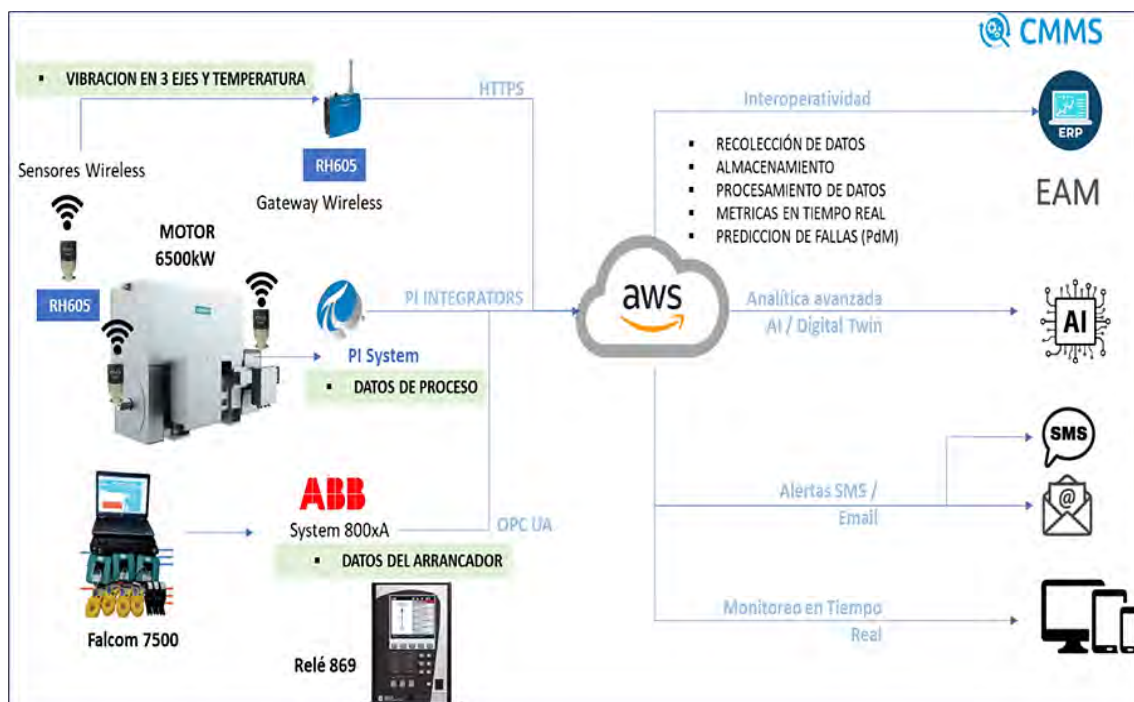
- **Accesibilidad Omnipresente.** Posibilidad de conectarse desde cualquier ubicación y en cualquier momento, utilizando diversos dispositivos con acceso a la red de internet.
- **Interacción B2C (Business-to-Consumer).** Facilita la interconexión entre la empresa y sus clientes, posibilitando que puedan revisar las características del servicio sin necesidad de interacción directa con el proveedor.

- **Multiusuario.** Posibilita la entrada simultánea de múltiples usuarios de la empresa a través de la misma plataforma en la red.
- **Externalización.** Las empresas pueden subcontratar la gestión de recursos informáticos a un proveedor especializado, suprimiendo costos asociados a la instalación y mantenimiento.
- **Multifuncionalidad.** Facilita el acceso a funciones específicas del sistema según las necesidades requeridas en el instante.
- **Economía Inteligente.** Se abona exclusivamente por los recursos utilizados en la nube (software, almacenamiento de datos, etc.), evitando costos vinculados a infraestructuras; por ejemplo, algunos proveedores ofrecen servicios de almacenamiento de datos, respaldo (*backup*) y restauración de equipos.

La figura 44 ilustra la centralización de la interacción en la nube, donde se aplica la computación en la nube al monitoreo, gestión de mantenimiento y control de activos físicos de los equipos. En este proceso, un motor envía señales que indican su estado de funcionamiento o posibles fallas. Toda esta información se almacena de forma centralizada en la nube, desde donde puede ser accedida para respaldar las decisiones vinculadas a la gestión de equipos.

Figura 44

Desarrollo de herramientas computacionales en la nube



Nota. Adaptado de Turco (2022)

1.9.5 Realidad Virtual y Aumentada (RVA)

Cabeza (2018) menciona la Realidad Aumentada y la Realidad Virtual como dos tecnologías que están impulsando el desarrollo de la Industria 4.0. Ambas herramientas utilizan modelos virtuales, pero se diferencian en cómo operan. En la Realidad Virtual, se genera un entorno completamente digital y virtual, por otro lado, la Realidad Aumentada se añaden elementos virtuales al entorno real. Es decir, la Realidad Aumentada es un modelo que enriquece la realidad existente con elementos virtuales. Estas tecnologías se utilizan principalmente con gafas o lentes virtuales, las cuales ya están disponibles en el mercado. Aunque inicialmente se desarrollaron para su uso en videojuegos y asistencia remota especializada, estas gafas permiten sumergirse en un mundo virtual que parece real.

La Realidad Aumentada utiliza gafas, *tablets*, *smartphones* u otros dispositivos semejantes para mostrar información gráfica en paralelo al movimiento de quien lo esté utilizando, combina el entorno de la realidad con el mundo virtual, facilita la interacción de manera instantánea y tiene información en 3D, visualización de datos, visión térmica, reconstrucción en 3D y puede guiar a realizar un trabajo por instrucciones verbales o escritas; mediante patrones y de aprendizaje la visión artificial o realidad virtual describe e identifica características de una imagen, permitiendo al usuario una inmersión en un entorno con apariencia real generado por software, es por ello que ambas tecnologías tienen aplicaciones industriales (Lizárraga, 2018).

Al implementar la Realidad Virtual y Aumentada en los procesos productivos de operación y atención de equipos generan beneficios con factores muy positivos o significativos: optimización de procesos, minimización de intervalos de espera, ampliación de las medidas de seguridad de los equipos y de las personas, y ahorro de costos (Cabeza, 2018).

Las herramientas o medios de interacción con la Realidad Virtual (RA) y Realidad Aumentada (RV) son las gafas, lentes y cascos especiales, acondicionados objetivamente para cada tipo de aplicación usuaria, ya sea para el entorno industrial, médico, civil o de ingeniería. En la figura 45 se muestran accesorios de la RV y RA.

Figura 45

Herramientas o medios de interacción con la RV y RA



Nota. Tomado de Lizarraga (2018)

La figura 46 presenta ejemplos de aplicaciones de Realidad Virtual y Realidad Aumentada en el ámbito del mantenimiento industrial.

Figura 46

Utilidades de la Realidad Virtual y Realidad Aumentada



Nota. Tomado de <https://images.app.goo.gl/ujtRLuzN6ofm7zw69>

1.9.6 Robótica colaborativa

La robótica es una rama tecnológica orientada en el diseño, construcción, estructuración, fabricación y operación de robots. Los robots son máquinas con movimiento autónomo, que pueden ser estacionarios o tener capacidad de desplazamiento propio y autónomo. Los robots diseñados para la industria manufacturera o de servicios pueden trabajar de manera ininterrumpida, sin fatiga, con una precisión y velocidad superior a la de los humanos. Así mismo poseen la capacidad de llevar a cabo tareas peligrosas o mortales, accediendo a entornos donde los humanos enfrentan limitaciones. La utilización de robots conlleva una producción más eficiente, la reducción de residuos, corrección de fallos y optimización de costos. Por tanto, presenta ventajas sustanciales en comparación con el trabajo humano. No obstante, hasta la fecha, los robots todavía requieren intervención humana en tareas colaborativas entre máquinas y en su diseño y concepción (Díaz 2020).

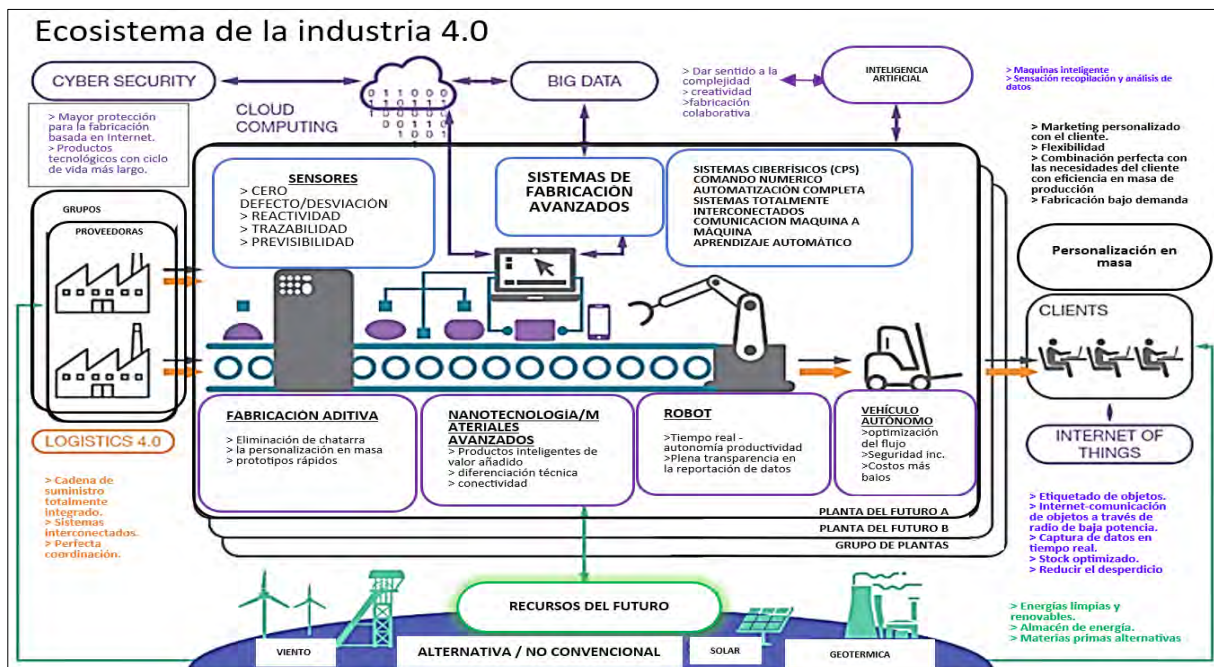
Cabeza (2018) resalta que, en la industria manufacturera de producción en línea, particularmente en procesos con cadenas de montaje, la robótica colaborativa aprovecha ampliamente el Internet de las Cosas (IoT). Esto permite lograr una mayor conectividad entre las máquinas, habilitando la interconexión automática entre máquinas (M2M, *machine to machine*), y proporcionando la capacidad de operar según la necesidad, además de asegurar un mantenimiento eficiente para cada máquina.

Lizárraga (2018) menciona que los Robots industriales dejarán de operar exclusivamente en ambientes cerrados y aislados, ahora se situarán cercanos a los trabajadores, compartirán su entorno y colaborarán mutuamente. Una nueva categoría de robots caracterizados por ser ágiles y fáciles de manejar dará forma a la innovadora “fábrica inteligente”.

En la representación visual que sigue, en la Figura 47 se presenta un ecosistema de Industria 4.0, donde se enfatiza la trascendencia de la robotización, automatización de los procesos. Estas tecnologías desempeñan un papel fundamental en la sostenibilidad de la cadena de valor del proceso de producción, complementándose con otras herramientas clave de la Tecnología Industria 4.0.

Figura 47

Ecosistema de Industria 4.0



Nota. Tomado de Marfán, M., Meller, P. (2019)

Capítulo 2

Planes de mantenimiento para equipos de carguío con Industria 4.0

2.1 Aplicación de Industria 4.0 en Mantenimiento

Desde su aparición la tecnología industria 4.0 generó un enfoque disruptivo en todas las operaciones de las empresas mineras. Este cambio busca no solo diferenciarse en el mercado y alcanzar rentabilidad, sino también lograr una optimización de costos y prolongar el ciclo de vida de los activos físicos. Ante el trasfondo tecnológico e industrial actual, así como el desarrollo del mantenimiento, surge la siguiente interrogante: ¿Es posible, factible y viable la implementación de las herramientas de la industria 4.0? en los procesos de gestión de activos y mantenimiento? El propósito de este estudio es abordar esta pregunta con un enfoque específico, centrándose en la aplicación de la industria 4.0 para el mantenimiento predictivo y la planificación de mantenimiento de equipos de carguío en una mina de cielo abierto.

En la Figura 48, se muestra las actividades y/o áreas de mantenimiento más relevantes que atienden los equipos o activos físicos dándole disponibilidad y confiabilidad.

Figura 48

Áreas de mantenimiento



Nota. Tomado de Araneda et al. (2022)

A continuación, se muestra en la tabla 3 los roles y alcances de las principales áreas de gestión de activos y mantenimiento que hasta la fecha se vienen desarrollando en las diferentes empresas mineras:

Tabla 3*Roles y funciones de las principales áreas de mantenimiento*

GESTION Y ATENCION DE MANTENIMIENTO TRADICIONAL			
A PALAS Y CARGADORES			
AREA	PROCESOS	DESCRIPCION	RESPONSABLE
	Identificación y Priorización de La Demanda	Recopila información: OTs, ordenes de trabajo: en base a planes de mantenimiento provenientes de la información de campo, del ERP-SAP, con la finalidad de crear una lista de trabajos	
Planificación	Planificación	Confeccionar un programa de sustentación a medio y largo plazo, donde se asignan los recursos necesarios a la relación de labores generadas por la priorización, distribuyendo equitativamente las horas disponibles y gestionando la disponibilidad efectiva de los recursos, asegurando al mismo tiempo la alineación con el presupuesto establecido.	Planificador Programador
	Programación	Trasladar el plan de mantenimiento en programas semanales, optimizando la utilización de los recursos, generando un “workpackage” al área de ejecución y ordenar las tareas pendientes en un programa, optimizando la ejecución de lo planificado, asegurando los recursos necesarios en campo, asegurando que las paradas de los equipos sean eficientes de tal manera que se cumpla con la disponibilidad proyectada.	
Ejecución	Ejecución	Llevar a cabo el programa de mantenimiento conforme al plan preestablecido, observando rigurosamente los procedimientos, protocolos de seguridad y estándares de calidad laboral. Coordinar las respuestas ante emergencias, correctivos, hallazgos y fallos que surjan durante la jornada. Evaluar y concluir las órdenes de trabajo ejecutadas durante el periodo de mantenimiento.	Supervisor de mantenimiento Especialista Técnico especialista Técnico operario Ayudante Socio estratégico
		Genera Avisos para transformarse en OTs según evaluación.	

GESTION Y ATENCION DE MANTENIMIENTO TRADICIONAL

A PALAS Y CARGADORES

AREA	PROCESOS	DESCRIPCION	RESPONSABLE
Confiabilidad	Post-Mantenimiento	Evaluar las posibilidades, deficiencias y puntos fuertes en el proceso de mantenimiento, generando nuevas estrategias para la vida útil del activo físico.	Ingeniero de confiabilidad.
		Estandarizar metodologías destacadas asegurando la mejora de los planes o actividades de mantenimiento.	Analista de monitoreo de ensayos.
		Examinar el rendimiento de los equipos y llevar a cabo un análisis detallado de las fallas.	Técnico de mantenimiento

Considerando el análisis de alternativas disponibles dentro del sector y con el propósito de mejorar las operaciones y procesos de mantenimiento en y la funcionalidad de sus aplicaciones, se estima y propone el nuevo enfoque de la gestión de mantenimiento adoptando o integrando las herramientas de la tecnología industria 4.0, en la Figura 49 se presenta un nuevo enfoque de mantenimiento alineado a tecnología industria 4.0 que se adoptará para el desarrollo del estudio o análisis del presente documento.

Figura 49

Gestión de Mantenimiento con Industria 4.0.



Nota. Adaptado de Turco (2022)

Así mismo en la siguiente figura 50 se presenta la analogía de los alcances de las herramientas de industria 4.0 y mantenimiento 4.0 resaltando su interacción para respaldar la formulación de la propuesta o estudio en curso.

Figura 50
Herramientas de la industria 4.0 y el Mantenimiento 4.0



Nota. Adaptado de Turco (2022)

Por consiguiente, conforme a los lineamientos y requisitos establecidos bajo las herramientas de la tecnología industria 4.0, el modelo de gestión de activos físicos y mantenimiento, así como sus herramientas y áreas de responsabilidad, deben orientarse hacia nuevos criterios de toma de decisiones y planes de acción. La figura 51 ilustra el modelo de mantenimiento con industria 4.0, que se plantea como cimiento para la elaboración del mantenimiento de equipos altamente críticos en la industria minera de tajo abierto.

Figura 51
Modelo de Mantenimiento con industria 4.0



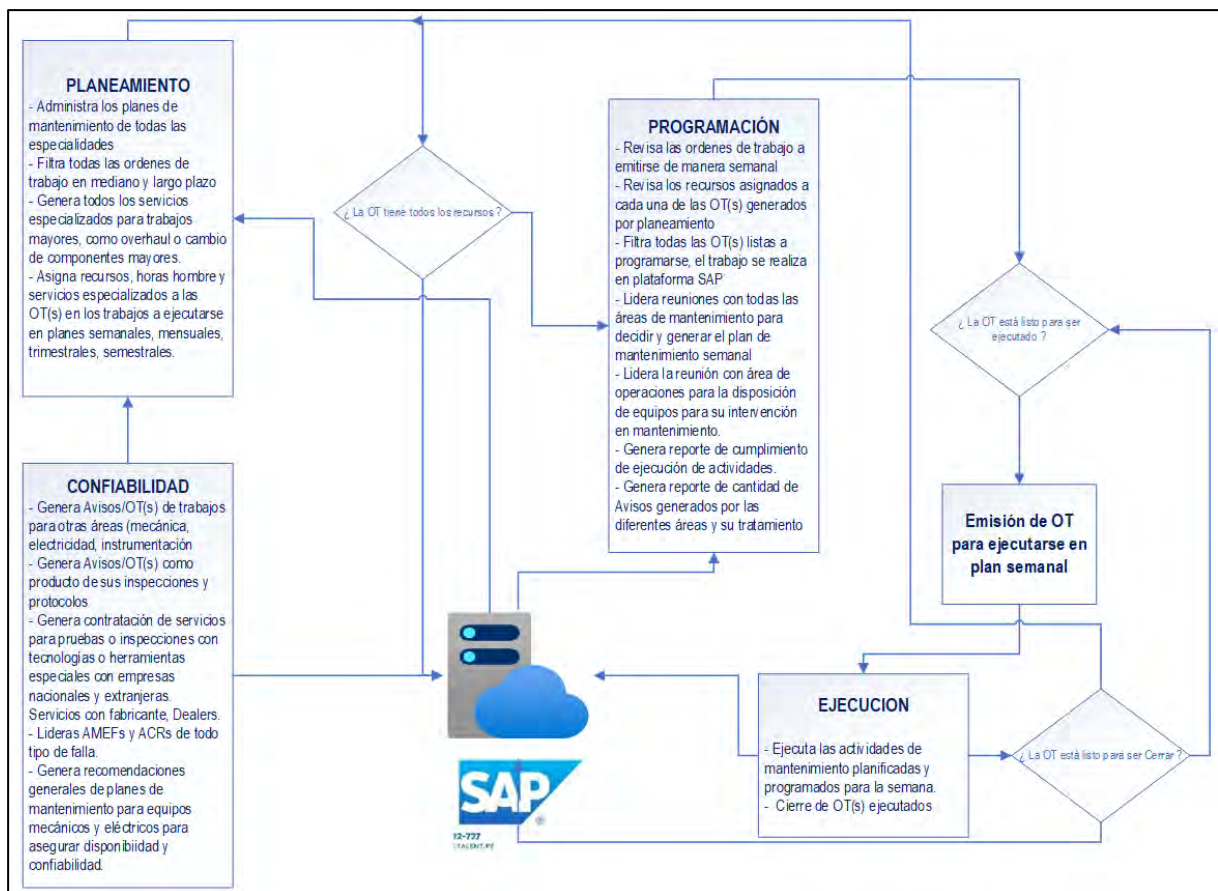
Nota. Tomado de Ferrera (2022)

2.1.1 Ciclo de la gestión de mantenimiento tradicional en equipos de carguío

En la figura 52, se especifica detalladamente las actividades de gestión de activos y mantenimiento en los equipos de carguío que actualmente se llevan a cabo en una mina de tajo abierto. Se observan actividades totalmente de “manual” en cada una de las áreas de atención de mantenimiento para los equipos, consideradas como actividades ejecutadas tradicionalmente. La herramienta principal para la administración de estas acciones es el ERP-SAP, que es utilizado por todas las áreas en el módulo PM.

Figura 52

Flujograma de Gestión de mantenimiento



2.1.2 Contexto operacional de gestión de mantenimiento en equipos de carguío

En la actualidad, en la empresa minera de tajo abierto, todas las actividades relacionadas con la gestión, planificación y programación de mantenimiento predictivo y preventivo de los equipos de carguío se realizan de forma manual. La recopilación de datos, los cálculos y el procesamiento necesarios para tomar decisiones en materia de planificación, mantenimiento predictivo y preventivo son llevados a cabo mediante procesos a cargo de personal y/o áreas interdisciplinarias.

La flota de carguío de la empresa minera de tajo abierto se compone de dos tipos de equipos: las palas Caterpillar CAT 7495 y los cargadores Komatsu LT 2350. El periodo bajo estudio abarca el año 2022. Durante este lapso, de enero a agosto, la flota constaba de seis equipos, distribuidos equitativamente entre tres palas y tres cargadores. En el mes de septiembre, se sumó a la flota un nuevo cargador LT2350. Para los cálculos de los indicadores clave de rendimiento (KPI), se consideran seis equipos desde enero hasta agosto y, a partir de septiembre, se incluye el séptimo equipo, totalizando así siete equipos en el análisis. La tabla 4 presenta algunos detalles de los equipos de la flota de carguío.

Tabla 4*Equipos de la flota de carguío*

Flota	Tipo de Equipo	Marca	Serie	Cantidad total	Capacidad de carguío
Carguío	Pala	Caterpillar	CAT 7495	3	85T
	Cargador	Komatsu	LT2350	4	70T

La Tabla 5 presenta en detalle los indicadores clave de rendimiento (KPIs), ofreciendo una visión cuantitativa y pormenorizada del desempeño mensual de la gestión de mantenimiento a lo largo del año 2022.

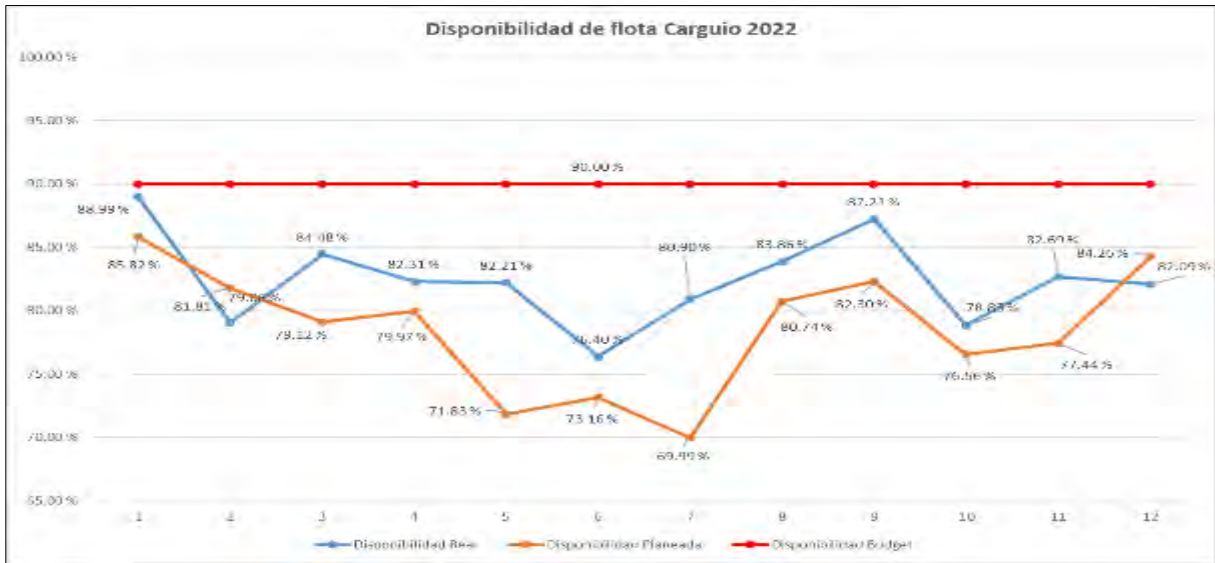
Tabla 5*Principales KPI de la gestión de mantenimiento en una mina de tajo abierto*

Año Mes Contable	Disponibilidad Real	Disponibilidad Planeada	Disponibilidad Budget	Detención Total (h)	MTBS_1	MTTR_1	NEquiposTotal	Indisponibilidad_T	N° Días
202201	88.99 %	85.82 %	90.00 %	396.36	9.9	1.5	6	11.0 %	25
202202	79.06 %	81.81 %	90.00 %	934.76	11.29	2.7	6	20.9 %	31
202203	84.48 %	79.12 %	90.00 %	625.77	10.58	1.4	6	15.5 %	28
202204	82.31 %	79.97 %	90.00 %	789.68	9.29	1.8	6	17.7 %	31
202205	82.21 %	71.83 %	90.00 %	768.53	10.75	1.4	6	17.8 %	30
202206	76.40 %	73.16 %	90.00 %	1053.50	10.83	0.7	6	23.6 %	31
202207	80.90 %	69.99 %	90.00 %	825.12	10.69	2.1	6	19.1 %	30
202208	83.86 %	80.74 %	90.00 %	720.49	10.11	3.7	6	16.1 %	31
202209	87.21 %	82.30 %	90.00 %	666.10	13.54	1.4	7	12.8 %	31
202210	78.85 %	76.56 %	90.00 %	1065.96	10.99	2.2	7	21.2 %	30
202211	82.69 %	77.44 %	90.00 %	901.50	11.67	2.5	7	17.3 %	31
202212	82.09 %	84.26 %	90.00 %	1083.20	12.46	2.7	7	17.9 %	36

En la Figura 53 se presentan las tasas de disponibilidad planificada, real y presupuestada correspondientes al año 2022 para los equipos de la flota de carguío en una mina de tajo abierto.

Figura 53

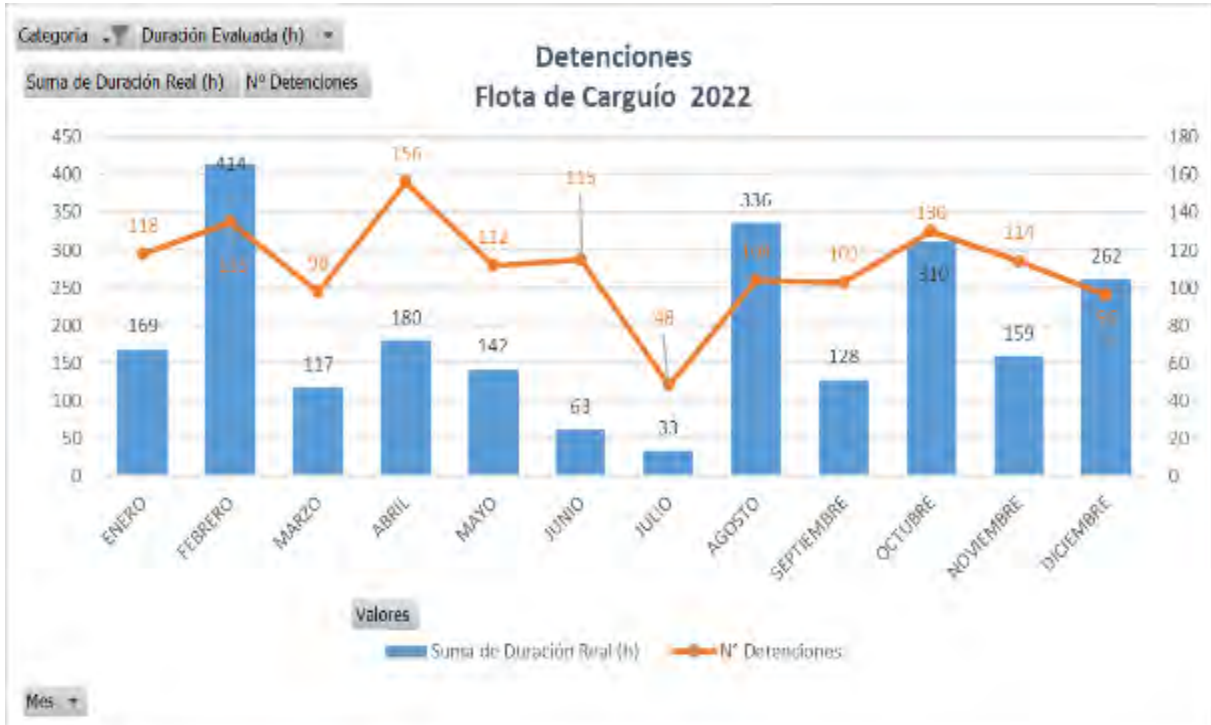
Disponibilidad real, budget y planificada del año 2022- Mina de tajo abierto.



En la Figura 54, se presentan las horas de indisponibilidad o detenciones de los equipos de carguío para cada mes del año 2022, junto con el número correspondiente de paradas.

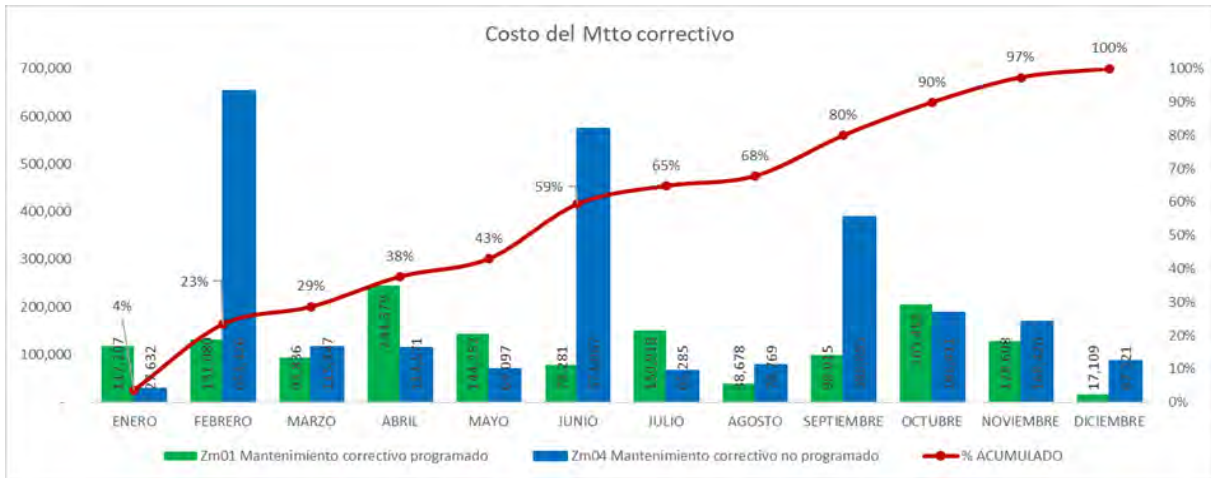
Figura 54

Detenciones de la flota de los equipos de Carguío 2022.



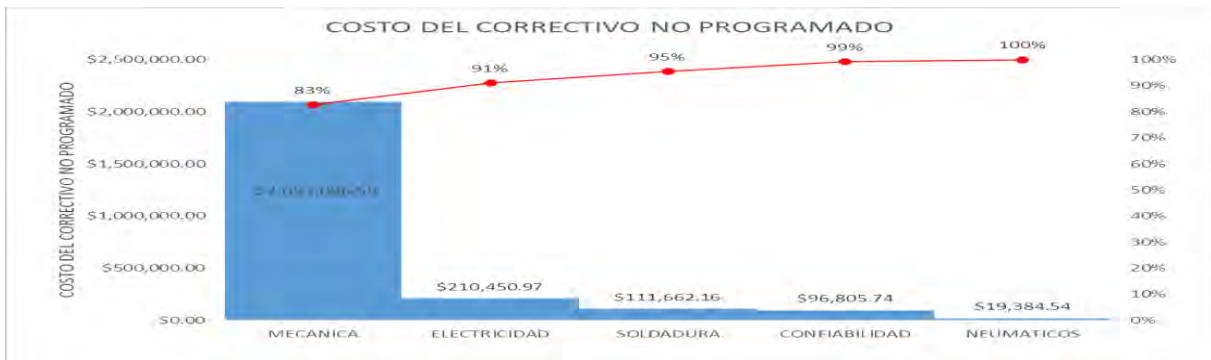
La Figura 55 exhibe el rendimiento de los gastos de mantenimiento planificados y no planificados para los equipos de carguío a lo largo del año 2022.

Figura 55
Costos de mantenimiento correctivo del año 2022



En la Figura 56, se presenta el rendimiento de los costos de mantenimiento correctivo durante el año 2022 para los equipos de carguío. Estos costos están desglosados por disciplina, reflejando las intervenciones realizadas por cada área para abordar las fallas correspondientes.

Figura 56
Costos de mantenimiento correctivo no programado en el año 2022



Las palas eléctricas CAT y los cargadores Komatsu son equipos esenciales para mover grandes cantidades de mineral. Las palas tienen una capacidad de movimiento de 6000 toneladas por hora, mientras que los cargadores pueden mover 2000 toneladas por hora. Debido a la cantidad de estos equipos en toda la mina, su buen funcionamiento es crucial para la producción de mineral, y cualquier tiempo de inactividad puede resultar en costosas pérdidas. Por esta razón, es fundamental implementar una estrategia operativa y táctica para garantizar que las palas y cargadores estén siempre disponibles y sean confiables. Esto implica realizar mantenimientos preventivos y correctivos de manera óptima, así como planificar y monitorear constantemente las condiciones operativas para prevenir posibles fallos. El objetivo es que estos equipos trabajen sin parar, las 24 horas del día, todos los días del año. La tabla 6 muestra el costo en pérdida por hora de cada equipo de carguío inoperativo.

Tabla 6

Costos en pérdida por hora de cada equipo de carguío inoperativo

	Palas Caterpillar	Cargadores Komatsu	Camiones Caterpillar	Camiones Komatsu
Cantidad	3	4	31	10
Capacidad de carguío	85 Tn	70Tn	--	--
Capacidad de transporte	--	--	400 Tn	400 Tn
Costo \$ por 1 hora parado	\$130,000.00	\$40,000.00	--	--
Nro de unidades cargadas en el día (24 hrs)	360	240		

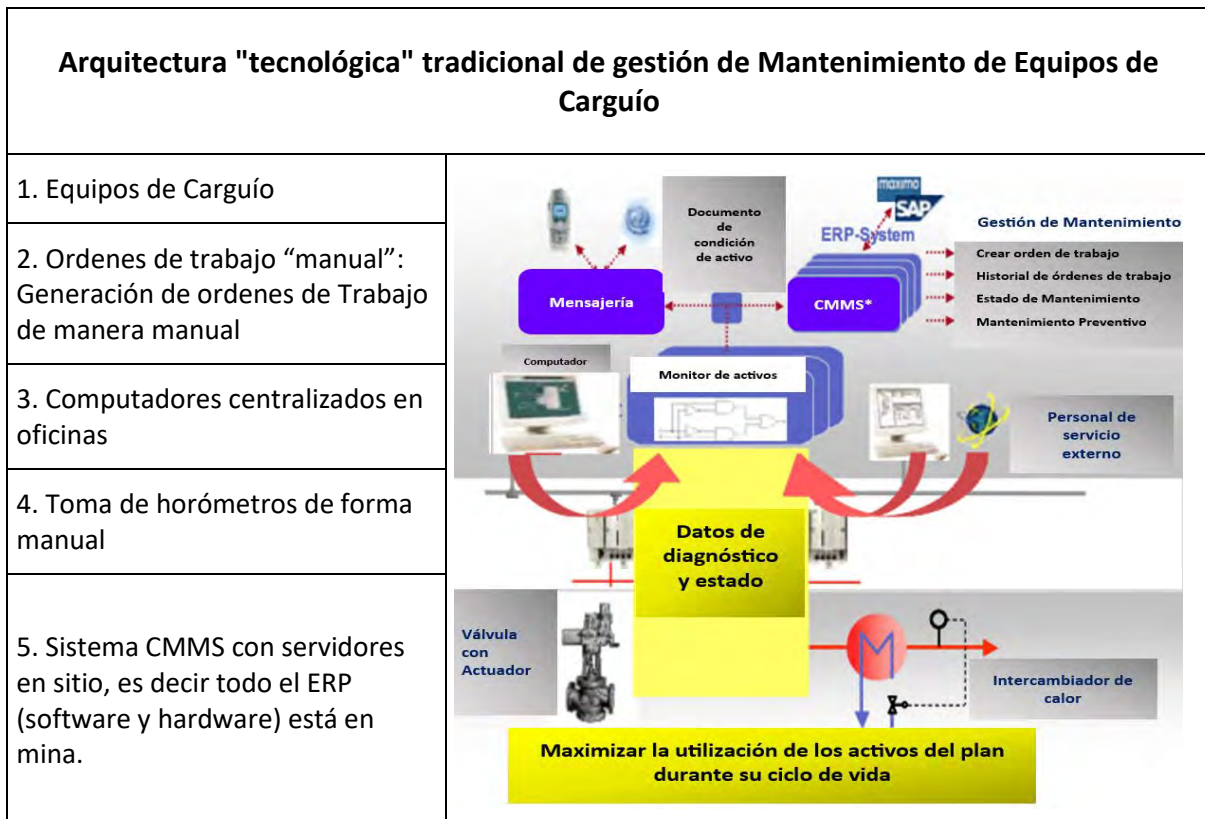
CONSIDERACIONES:
 1. Las palas eléctricas Caterpillar tienen una capacidad de movimiento de mineral del 6000 Tn/h
 2. Los cargadores LT Komatsu tienen una capacidad de movimiento de mineral de 2000 Tn/h
 Por la cantidad de equipos, cargadores y palas, en toda la mina que generan la producción de mineral a ser procesado, los equipos indicados son muy críticos, considerando un alto costo de pérdida la inoperatividad de los mismos.
 Es por ello que las palas y cargadores necesitan una estrategia operativa y táctica para que su disponibilidad y confiabilidad sean altas, las atenciones de mantenimiento preventivo y correctivo sean los más óptimos posibles así como los procesos de planeamiento y monitoreo de condiciones operativas, funcionales y potenciales fallas: **"idealmente los equipos no deben parar, deben trabajar las 24 horas todos los días del año"**

2.1.3. Arquitectura tecnológica industria 4.0 para el nuevo modelo de Mantenimiento para equipos de carguío

Para distinguir claramente el modelo propuesto en este estudio, se presenta en la Tabla 7 la arquitectura convencional y sus elementos asociados, destinados a la supervisión, gestión y ejecución de mantenimiento en los equipos de carga utilizados en diversas operaciones mineras de tajo abierto, específicamente en entornos de gran minería.

Tabla 7

Arquitectura "tecnológica" tradicional de gestión de mantenimiento de equipos de la flota de carguío



Nota. Tomado de <https://new.abb.com/oil-and-gas/production-book/utility>

A continuación, se presenta la Figura 57, que exhibe la nueva arquitectura propuesta como una solución innovadora para la gestión de mantenimiento de los equipos de carga en una mina de tajo abierto.

Figura 57

Propuesta de arquitectura para la gestión de mantenimiento



Nota. Adaptado de Araneda et al. (2022)

2.2. Herramientas de industria 4.0 a adoptar para planes de mantenimiento

Seguidamente, se proporciona un análisis minucioso y cualitativo de todas las herramientas de la Industria 4.0 que se emplearán en la creación del modelo de mantenimiento y gestión de activos. Este enfoque se basa en el aprovechamiento de tecnologías emergentes cuya aplicación y adopción se consideran factibles y viables.

2.2.1. Monitoreo de condición con internet de las cosas IoT a Palas y Cargadores

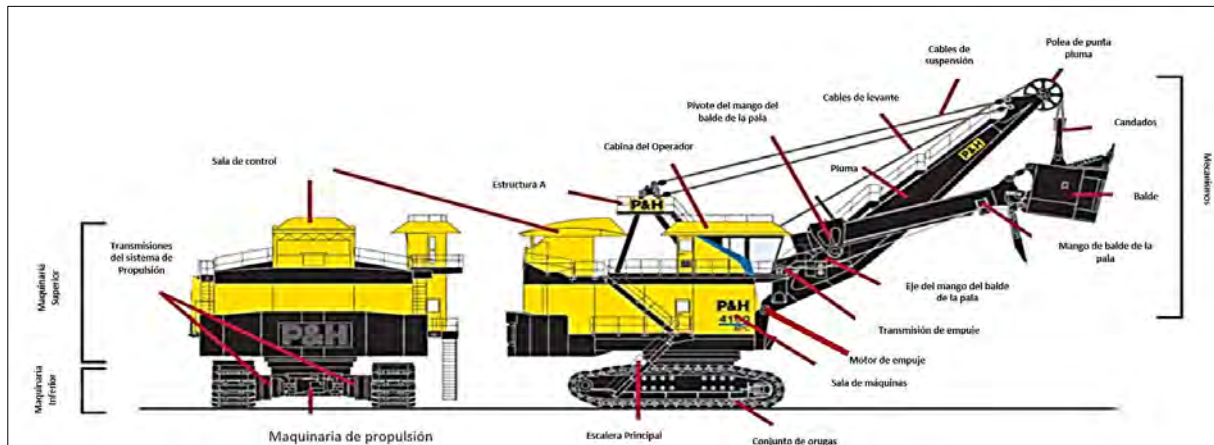
Las palas eléctricas y cargadores de gran tonelaje tienen los siguientes sistemas de accionamiento para su traslado y carguío:

- Sistema Motor Diesel.
- Sistema Motores eléctricos.
- Sistema eléctrico de distribución para motores auxiliares.
- Sistema hidráulico para el levante de cilindros hidráulicos.
- Sistema de frenos.
- Sistema de transmisión.

En las Figuras 58 y 59 se presenta una visión general de todos los componentes o sistemas de palas empleados en la industria de gran minería.

Figura 58

Vistas de una Pala utilizada en gran minería para el carguío

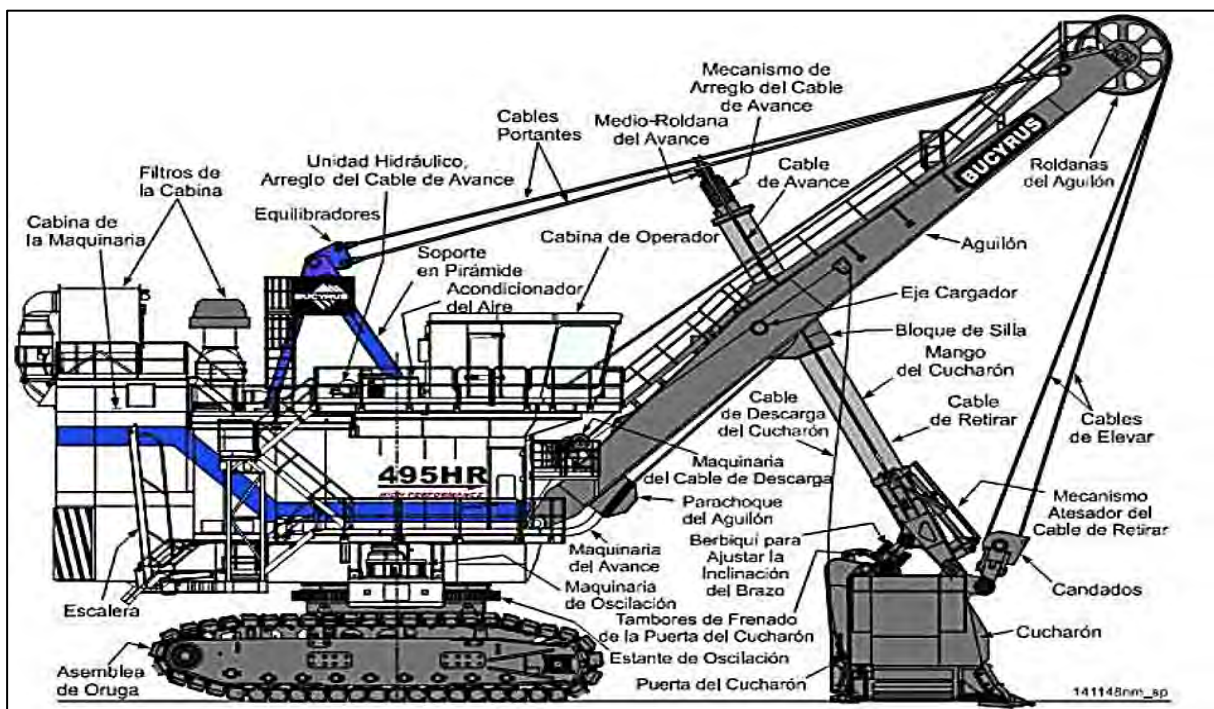


Nota. Adaptado de Palacio (2018)

La Figura 59 proporciona una visión general de una pala eléctrica Bucyrus 495HR, destacando la nomenclatura asociada a la máquina. Actualmente, esta serie de equipos forma parte de CAT bajo el nombre de Pala Eléctrica de Cables, perteneciente a la serie 7495 CAT.

Figura 59

Nomenclatura de pala eléctrica CAT 7495, originalmente BUCYRUS 495HR

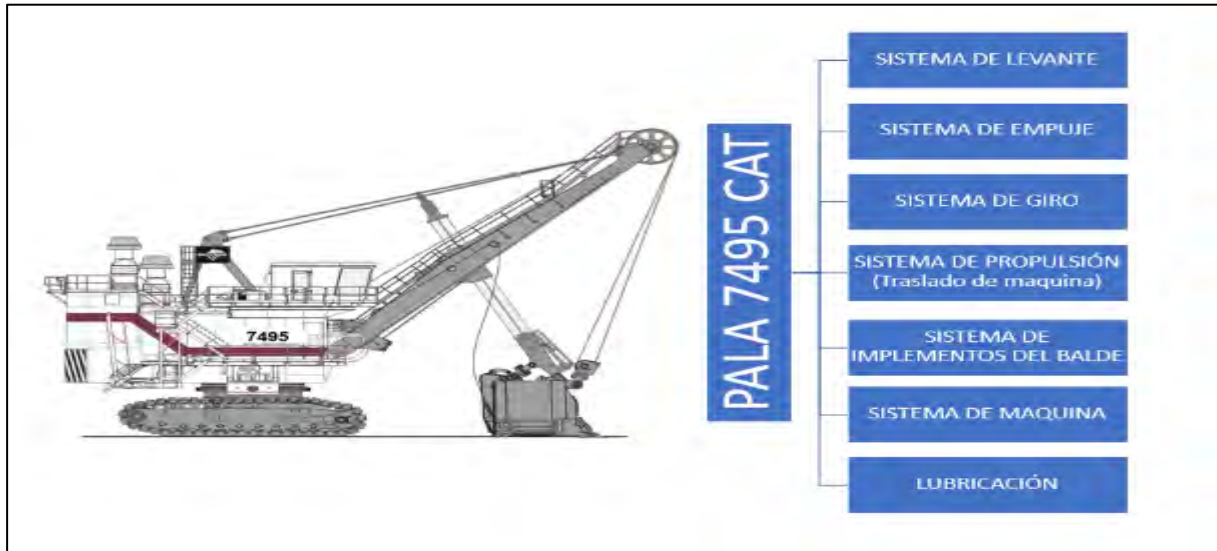


Nota. Tomado de Manual de operación BUCYRUS 495HR (2009)

La figura 60 se muestra los principales sistemas de accionamiento de una pala eléctrica de cables, al cual se selecciona como partes a implementar sensorización para desarrollar mantenimiento con herramientas de industria 4.0.

Figura 60

Principales sistemas de una pala eléctrica de cables, serie CAT 7495



Nota. Adaptado de Manual de operación de la pala CAT 7495 (2015)

La siguiente figura 61 se muestra los principales sistemas de accionamiento mecánico-hidráulico de un cargador LT2350 al cual se selecciona como partes a implementar sensorización para desarrollar mantenimiento con herramientas de industria 4.0

Figura 61

Principales sistemas del cargador Komatsu de serie LT 2350

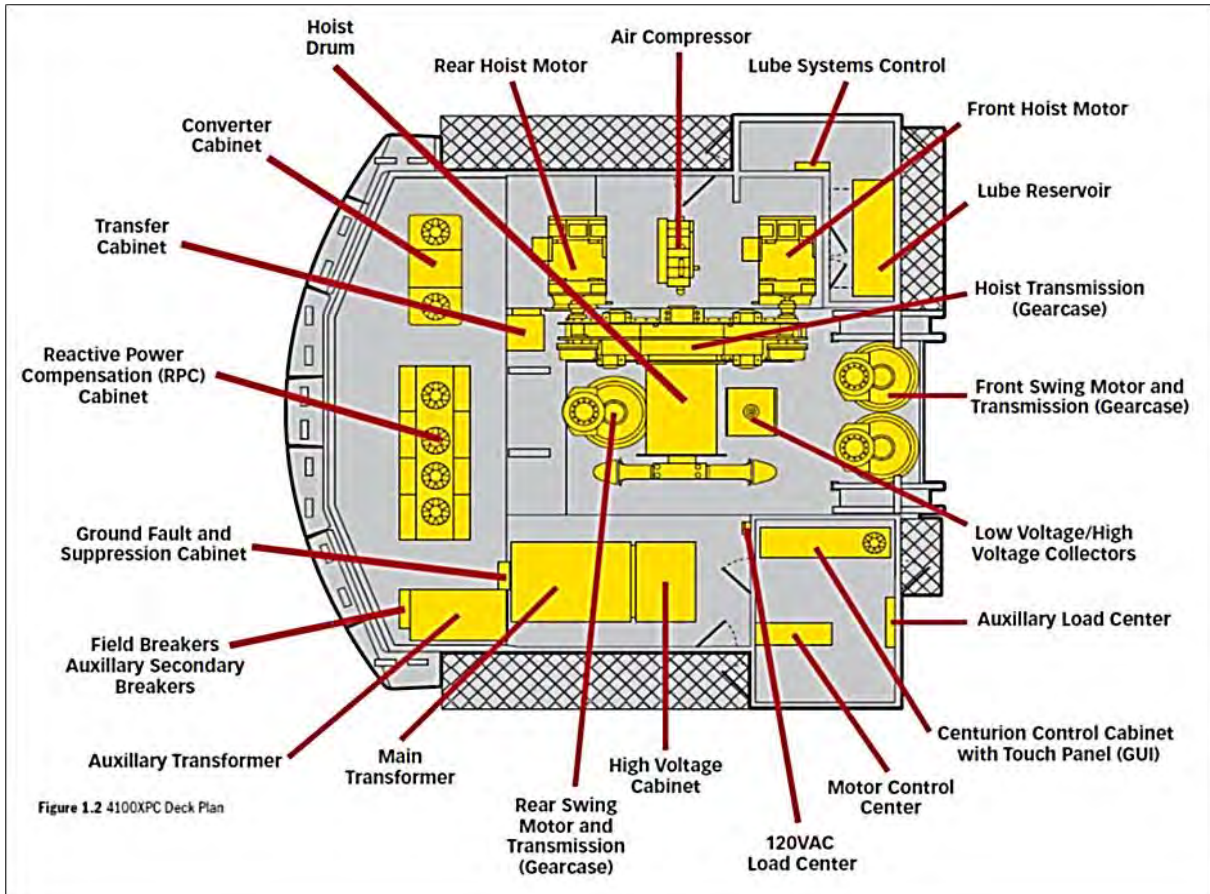


Nota. Adaptado de Manual de operación de LT2350 (2015)

En la Figura 62 se muestra en detalle las partes principales del sistema de propulsión y mandos de accionamiento de una pala CAT 7495 localizados en la plataforma principal de comando y utilización, en donde se identifica cada uno de los subsistemas o elementos que son parte de la adaptabilidad de sensores de monitoreo bajo el entorno del IoT.

Figura 62

Sistema de propulsión y mandos de accionamiento de una pala CAT 7495

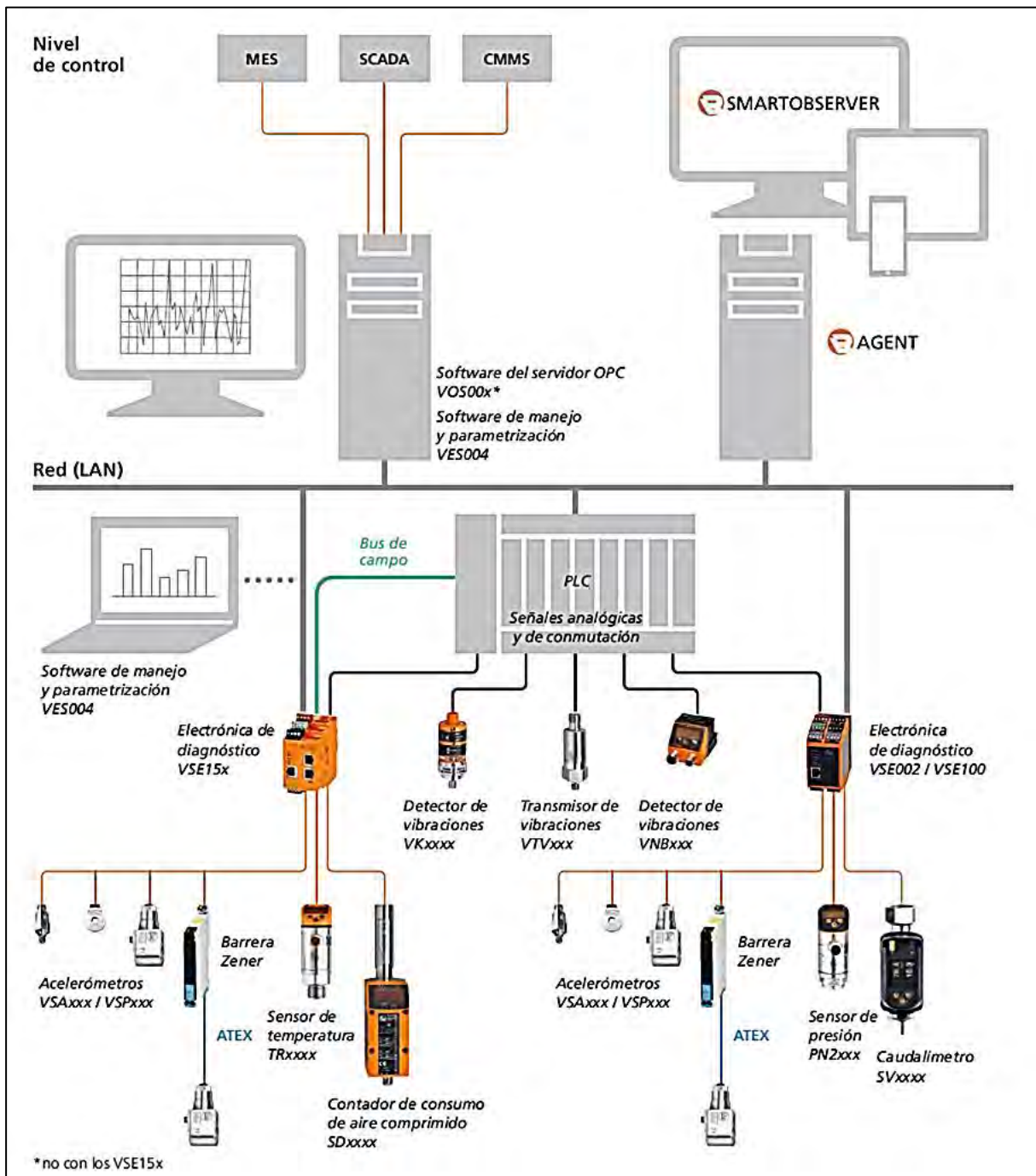


Nota. Tomado del Manual de operación de la pala CAT 7495 (2015)

Aplicando los alcances de internet de las cosas, los sensores existentes en el mercado y las soluciones de sensorización que ofrece los *dealer* o fabricantes de los equipos o componentes de cada sistema, es factible y viable implementar la sensorización y mapeo de estado de los componentes e integrarlo a un sistema-servidor. Esto permitiría disponer los datos e información de cada uno de los sensores de manera eficiente y precisa. En la Figura 63 se ilustra un modelo de sensorización en detalle de un sistema electromecánico, las señales de los sensores son llevados a integradores, luego a equipos PLC centralizados, luego todas las señales son llevados una plataforma de lectura, visualización, control y direccionamiento hacia un servidor donde se tiene un nivel de control total en base a un sistema SCADA y un CMMS, para luego llevarlos a diferentes plataformas o aplicaciones que son controlados por otros servidores en donde se puede tener un control remoto pajo plataformas tipo Dashborads.

Figura 63

Ejemplo de sensorización en detalle de un sistema electromecánico



Nota. Adaptado de Turco (2022)

En la siguiente Tabla 8 se muestra la diferenciación de un mantenimiento tradicional y un mantenimiento con industria 4.0 en el enfoque internet de las cosas

Tabla 8

Diferencia entre un mantenimiento tradicional y un mantenimiento con Industria 4.0

Mantenimiento tradicional	Mantenimiento Industria 4.0
Monitoreo de condiciones	Sensorización vía IoT
<p>Monitoreo de vibraciones, temperatura y sonido es en forma manual: el técnico de mantenimiento predictivo debe ir a campo llevando un equipo portátil para medir vibraciones (axial, horizontal y vertical) en cada uno de los componentes que trabajan bajo el contexto de vibración, así mismo para realizar termografía.</p> <p>Equipos de monitoreo con modos de falla funcional debido al transporte y uso, ocasionando una baja confiabilidad en los valores obtenidos.</p> <p>El tiempo que demanda para realizar la medición, en el transporte, es alto</p>	<p>Monitoreo de vibraciones, temperatura y sonido es a distancia: el técnico de mantenimiento predictivo NO debe ir a campo para realizar mediciones, ingresa al sistema centralizado de monitoreo de los sensores, cámaras y dispositivos de IoT para recoger de campo las lecturas de cada tipo y aplicación de sensor.</p> <p>La instalación de sensores en el sistema del equipo, junto con su interconexión para el monitoreo, permite la obtención de valores altamente confiables en tiempo real.</p> <p>No se demanda equipo detenido para realizar la medición, no hay pérdida de tiempo para realizar las mediciones</p>

2.2.2. ERP – SAP con Cloud Computing

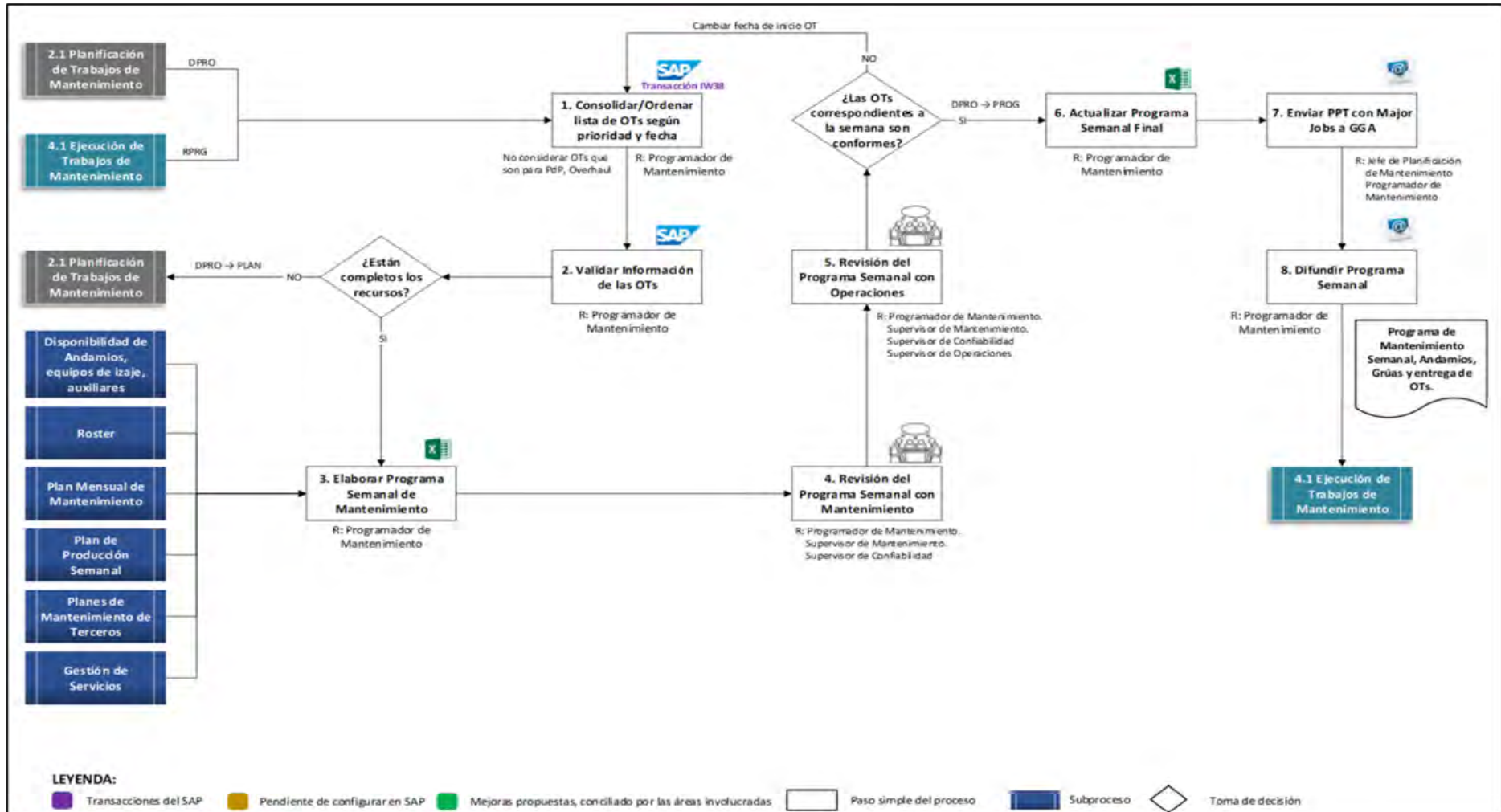
A la fecha el control o administración de los procesos de planificación y programación está en base a procedimientos de gestión estructurados para:

- Actividades con alcances para el área de “Planeamiento”
- Actividades con alcances para el área de “Programación”
- Administración y control de la demanda, que se refiere a cómo se gestiona la demanda de ordenes trabajo en función a las disciplinas de mantenimiento mecánico, eléctrico, soldadura, monitoreo predictivo, lubricación y actividades de servicio u *overhaul*.

En las figuras 64, 65 y 66 siguientes se presentan los tres flujogramas respectivos, donde cada acción o subproceso es ejecutado de manera "manual" por una persona designada (programador o planificador). Estas tareas se llevan a cabo ingresando al ERP-SAP desde una estación ubicada en las instalaciones del taller *Truckshop*, o desde una computadora personal equipada con el programa SAP y programas auxiliares como Excel y Project.

Figura 64

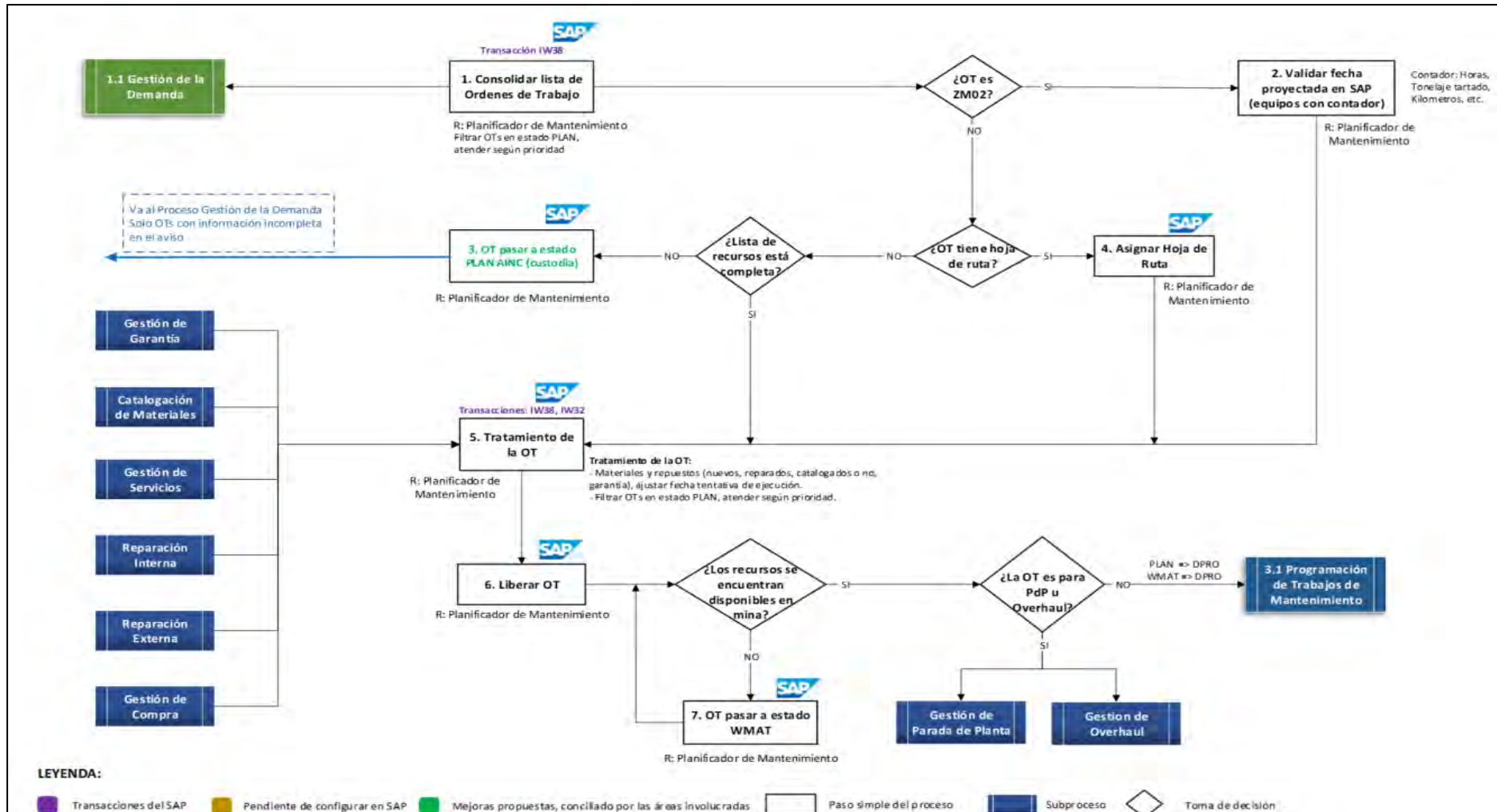
Flujograma del proceso de programación



Nota. Tomado de procedimientos de ingeniería de mantenimiento-planeamiento de una mina de tajo abierto (2023)

Figura 65

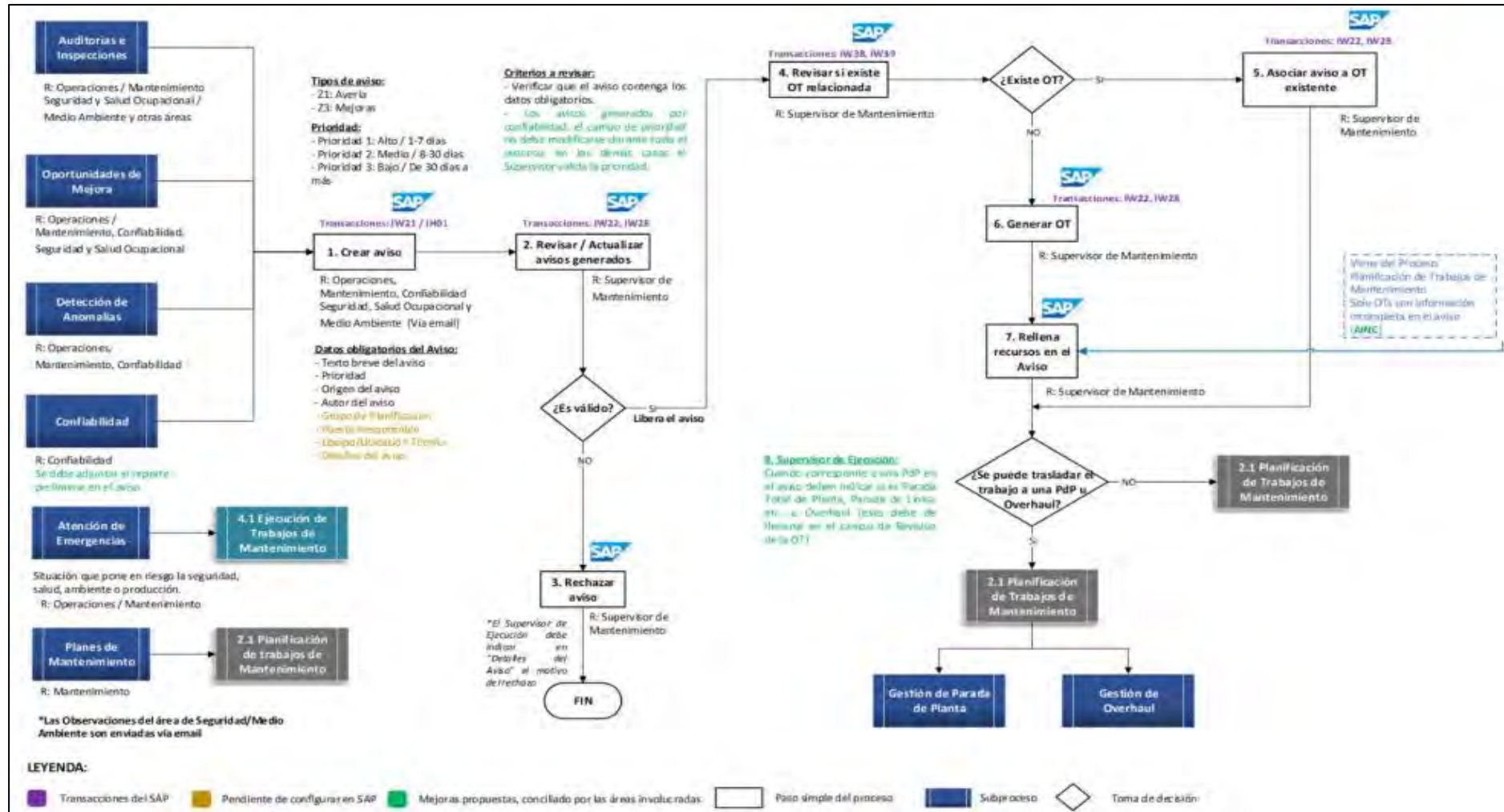
Flujograma del proceso de planificación



Nota. Tomado de procedimientos de ingeniería de mantenimiento-planeamiento de una mina de tajo abierto (2023)

Figura 66

Flujograma del proceso de la demanda de trabajos correctivos



Nota. Tomado de procedimientos de ingeniería de mantenimiento-planeamiento de una mina de tajo abierto (2023)

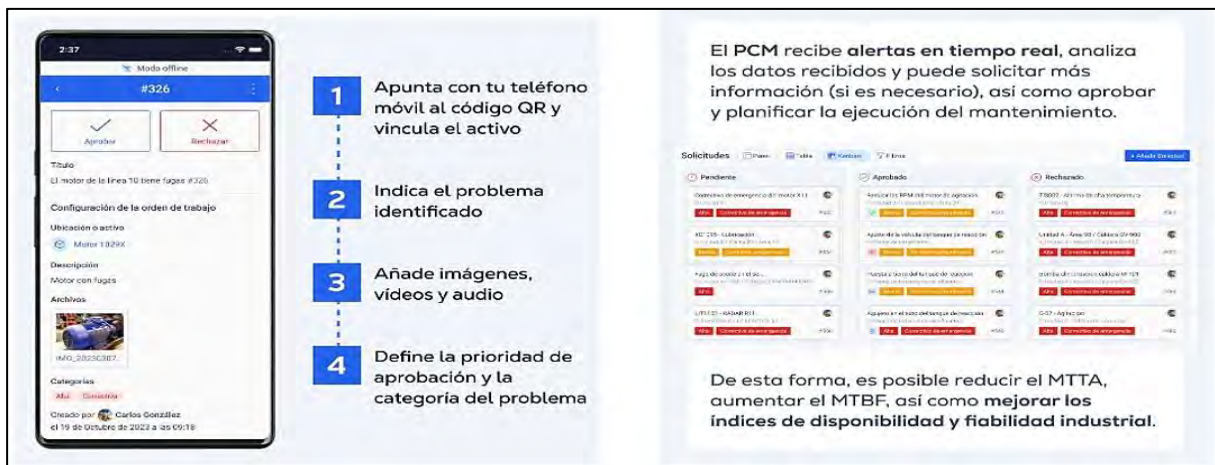
A la fecha existen mejoras para los CMMS - ERP SAP bajo el enfoque de la automatización y transformación digital, es posible la implementación de solicitudes de mantenimiento a distancia con la implementación y utilización de alguna aplicación (App) que esté directamente comunicada con el ERP-SAP.

Entonces, es posible realizar un upgrade de los procesos y mecanismos de planeamiento y programación con la utilización de ERP-SAP *Cloud Computing*, por ser factible y viable.

En la siguiente Figura 67 se muestra una parte de un aplicativo que fue creado por una empresa integradora de plataformas-aplicativos para mejoras de CMMS-ERPs

Figura 67

Aplicativo PCM para mejorar la gestión de mantenimiento.



Nota. Tomado de Marfán, M., Meller, P. (2019)

La Tabla 9, se expone la diferenciación entre un mantenimiento tradicional y un mantenimiento con industria 4.0 en el enfoque *Cloud Computing* ERP-SAP.

Tabla 9

Mantenimiento tradicional y Mantenimiento con Industria 4.0

Mantenimiento tradicional	Mantenimiento i 4.0
Gestión de Ordenes de Trabajo y repuestos para mantenimiento preventivo-correctivo-predictivo	ERP – SAP con <i>Cloud Computing</i>

El planificador-programador debe ingresar solo desde la PC en planta o mina para ingresar a SAP o desde la ciudad por internet en una PC que tiene el programa ERP para generar las órdenes de trabajo para las distintas disciplinas.

El sistema ERP-SAP se encuentra alojado en un servidor en la nube, lo que permite su ejecución desde cualquier ubicación geográfica. En lugar de depender de una infraestructura física local, esta implementación en la nube posibilita acceder y utilizar el ERP-SAP de manera remota,

<p>Es necesario filtrar las órdenes previas y activar el plan de mantenimiento para generar la siguiente Orden de Trabajo (OT). La asignación de repuestos y recursos debe llevarse a cabo manualmente, importando archivos para validar y procesar la información, lo que permite calcular y estimar las horas-hombre.</p>	<p>brindando flexibilidad y accesibilidad desde diversos lugares y dispositivos con conexión a Internet.</p>
<p>Se recurre frecuentemente al uso del programa Excel y otras herramientas de Microsoft Office desde la computadora física para validar manualmente la información del equipo. Esto incluye el seguimiento de los horómetros, los últimos cambios de componentes y las últimas detenciones.</p>	<p>Las aplicaciones necesarias como soporte para el ERP-SAP están disponibles y se utilizan de manera inmediata desde la nube, permitiendo el acceso desde cualquier lugar del mundo. Esto posibilita la obtención de información sobre el stock de repuestos en los almacenes, así como detalles sobre notificaciones y condiciones relevantes de trabajos anteriores.</p> <p>Se puede disponer de todo los datos e información de los sistemas de monitoreo y funcionamiento (horómetros) de los equipos en forma remota e inmediata.</p>
<p>El ERP utilizado sirve constantemente como herramienta auxiliar para exportar los datos al programa Excel.</p>	<p>Los datos y la información se calculan e ingresan al ERP-SAP mediante aplicaciones de interfaz diseñadas para cada tipo de información.</p>

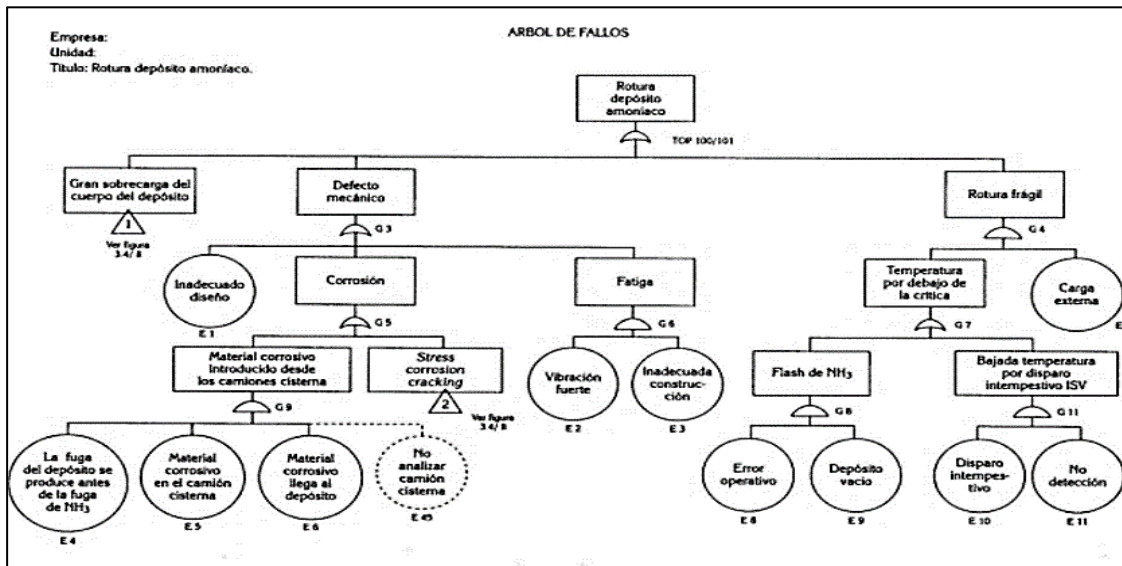
2.2.3. Análisis de fallas con Machine Learning

Las personas y colaboradores del área de mantenimiento son fundamentales para la implementación, desarrollo y mejora de la aplicación de la tecnología Industria 4.0. Se destacan como la columna vertebral y el corazón del proceso, enfocándose en potenciar habilidades blandas, actitud proactiva, sentido de propiedad preventiva, flexibilidad cognitiva y adaptabilidad. Además, se requiere un profundo conocimiento de los modos de falla de los equipos, la promoción del dominio en el manejo de datos y la interacción efectiva con equipos tecnológicos. Es crucial que el enfoque se base en el aprendizaje de los modos de falla de los equipos, comenzando por los ejecutores o especialistas de cada disciplina y avanzando hacia un modelo de formación integral.

- Capacidad de aprender más rápido, *“learning by doing”*
- Formación en entornos colaborativos
- Aprender con las tecnologías que se usarán
- Consolidar conocimientos de forma mucho más práctica
- Simulación de la realidad
- Uso de técnicas inmersas: realidad virtual y aumentada, activos digitales (Gemelos Digitales).

A la fecha el análisis de falla se realiza bajo dos técnicas o herramientas de ACR: análisis de los 5 porqués y el árbol lógico; estas metodologías son de elaboración o desarrollo manual, el cual demanda tiempo y presencia de personas especialistas de las diferentes áreas o especialidades de atención del mantenimiento de equipos de carguío. En la siguiente Figura 68 se presenta un ejemplo de árbol lógico bajo el cual se encamina un ACR.

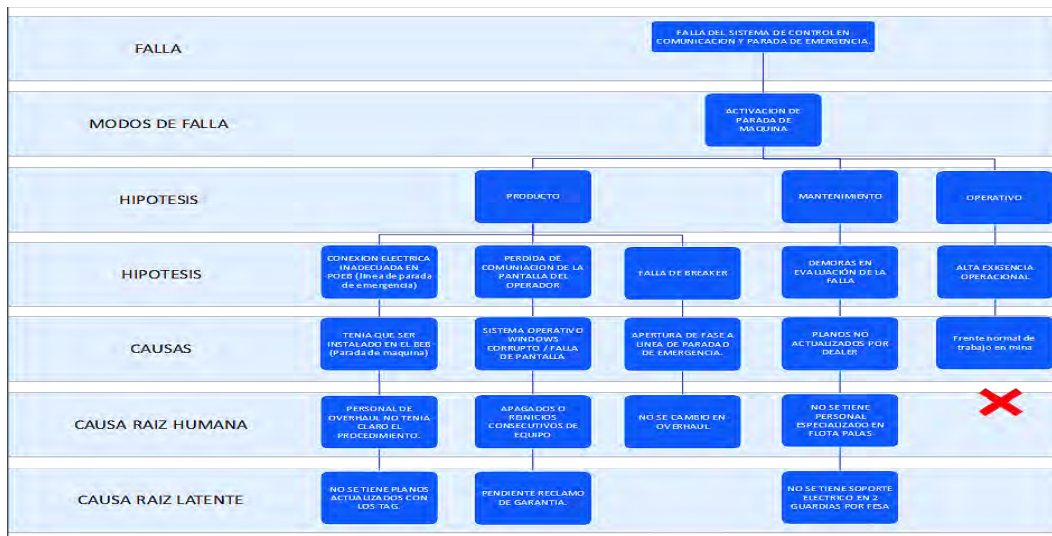
Figura 68
Árbol lógico para un ACR



Nota. Tomado de Pérez (2019)

La siguiente Figura 69 muestra un ACR realizado para con un equipo de carguío en una mina de tajo abierto.

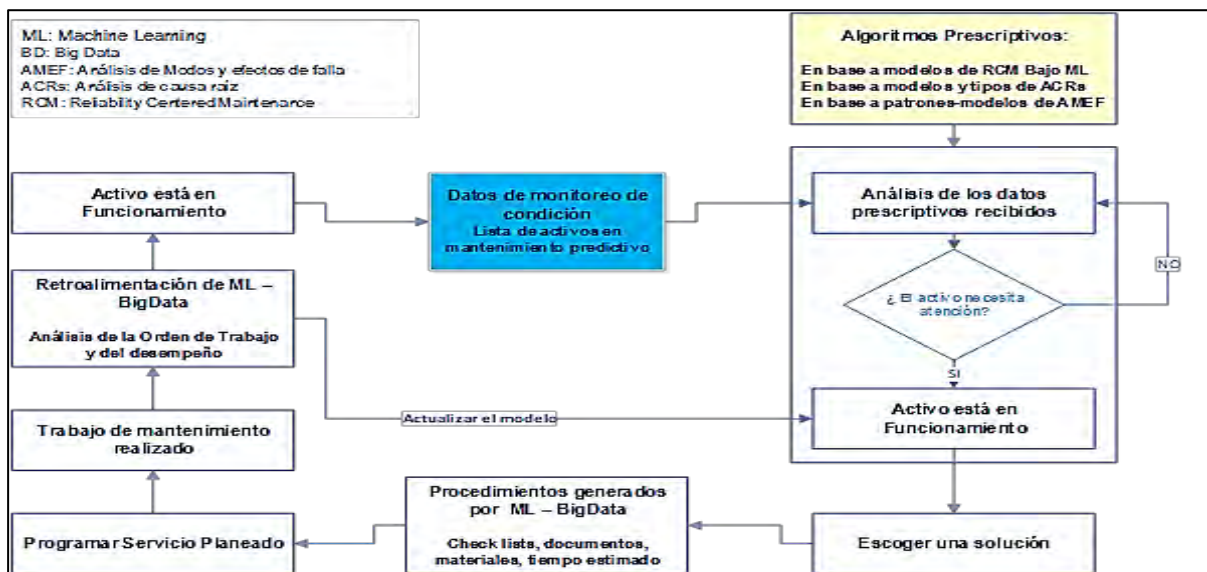
Figura 69
Ejemplo de ACR en equipos de carguío



Nota: Tomado de los reportes de confiabilidad de una mina de tajo abierto (2023)

En base a las metodologías de ACR, AMEF y técnicas de RCM se plantea que es posible a través de *Machine Learning* proceder con una análisis lógico-matemático de un ACR para todos los tipos de fallas, en la Figura 70 se muestra una lógica básica que puede ser adaptada bajo los principios y enfoque de *Machine Learning* para el tratamiento de fallas, en base a poder disponer todos los patrones de fallas de todos los sistemas de los equipos de carguío de una mina de tajo abierto.

Figura 70
ACR con Machine Learning



Nota. Adaptado de Maisueche, A. (2019)

En la siguiente Figura 71 se muestra una lógica tratamiento a los modos de falla en función a un análisis AMEF.

Figura 71
Lógica de tratamiento de modos de falla con AMEF

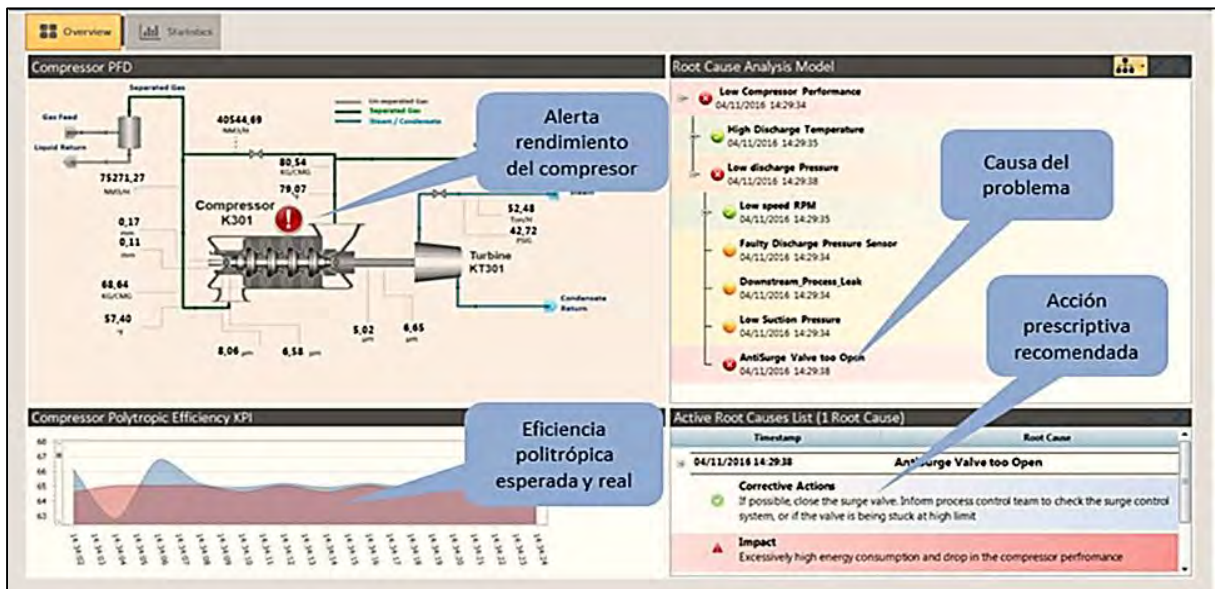
Proceso / Función	Falla Potencial	Modo de Falla	Efecto	Control Prevención / Detección	SI	OI	DI	NPRI	Acción Recomendada						
Inyección de pieza	Acabado con rebabas	Presión excesiva	Retrabajo	Presión regulada por el operador e inspección visual de la falla	9	6	10	540	Instalar sensores y válvula limitadora de presión en la inyectora						
Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto	SI	Calificación	Causa	O	Método de detección	DI	NPRI	SI	OI	DI	NPRI	Acción
Bombear agua de alimentación al sistema de agua de tratamiento a las condiciones de flujo y presión requeridas.	Bombas menos del caudal o presión requeridos	Holgura excesiva en Anillos de desgaste	Pare por alta temperatura del fluido entrado	3	WD	Desgaste - Desgaste normal	1	Indicación local y en panel de control de bajo flujo/presión	1	3					Monitoreo diario de flujo y presión y análisis mensual de datos o en caso de detectar condiciones anormales, lo que suena primera
				3	WD	Inclusión - Solidos en exceso en el fluido causando desgaste prematuro	3	Indicación local y en panel de control de bajo flujo/presión	1	9					Monitoreo diario de flujo y presión y análisis mensual de datos o en caso de detectar condiciones anormales, lo que suena primera Revisar lecturas de presión diferencial del filtro de succion en colector de datos operacionales y cargarlos al RDBM software

Nota. Tomado de Villegas 2023

Entonces, bajo un enfoque de *Machine Learning*, se tendrían avisos, correos, notificaciones y alertas de monitoreo de modos de falla y su tratamiento. En la Figura 72 se muestra un desarrollo de software para ACR que es factible y viable implementarlo a equipos de carguío.

Figura 72

Flujo de algoritmo para aplicar Machine Learning en Palas y Cargadores



Nota. Tomado de Emerson (2020)

La Tabla 10 expone la diferenciación entre un mantenimiento tradicional y un mantenimiento con Industria 4.0 en el ACR con *Machine Learning*.

Tabla 10

Diferencia entre un ACR tradicional y un ACR con Machine Learning

Mantenimiento tradicional	Mantenimiento i 4.0
Análisis de Causa Raíz - ACR	ACR – <i>Machine Learning</i>
<p>El especialista de confiabilidad de determinado equipo cita a una reunión multidisciplinaria para desarrollar el ACR “de forma manual”, exponiendo o mostrando imágenes, contexto operacional e imágenes de tendencias de los parámetros monitorizados por sensores básicos en determinados puntos del equipo.</p>	<p>El <i>Machine Learning</i> toma como base de sus procesos la lógica del ACR convirtiéndola en un algoritmo de decisión para los modos de falla.</p> <p>Todas las fallas deben ser “catalogados”-identificados mediante códigos. El analista o ingeniero de confiabilidad alimentará al ML con imágenes, datos e información para que se comparen</p>

<p>Las metodologías más utilizadas es el de 5 porqués y espina de pescado, que la valoración dependerá del especialista mejor sustente su análisis a la falla.</p>	<p>patrones de falla con cada tipo de efecto y para determinado sistema.</p>
<p>Los planes de acción, la gestión de las acciones a tomar por cada disciplina (mecánica, electricidad, instrumentación, confiabilidad o planeamiento) se realizan de manera “manual” mediante la creación de OTs que ayuden a la ejecución del trabajo, compra de repuesto, análisis especializado y planes de inspección o seguimiento a la reparación de la falla.</p>	<p>ML gracias al <i>Big Data</i> emitirá órdenes de planes de acción para: compra de repuestos, generación de ordenes de trabajo para que el planificador planee la intervención el equipo en condición de potencial falla en función al patrón de falla prescripta.</p>

Consideraciones:

- El ACR se establece como base esencial en el proceso de con *Machine Learning*, desempeñando un papel fundamental en su estructura.
- El *Machine Learning* procesa y utiliza el ACR para generar algoritmo de decisión.
- El resultado final en un algoritmo refinado que incorpora las reglas derivadas del ACR.


2.2.4. Diagnóstico de falla con realidad virtual y aumentada

A la fecha en las operaciones y/o procesos de gestión de activos y mantenimiento de palas y cargadores, así como del resto de flotas de equipos para operaciones mina, no se tiene implementado alguna herramienta de asistencia remota que permita un diagnóstico o identificación de una falla y la reparación con intervención directa de un especialista para cada tipo de componente, lo que se tiene es un servicio “especializado” en campo de equipos Komatsu y Cat, quienes son personal permanente en mina con “especialistas” para motores, equipos eléctricos e hidráulicos, mientras no se presente una falla generan un reporte monitoreo de condiciones, este reporte es con limitaciones, ya que tienen que solicitar acceso al estado de repuestos, compras o información de otras áreas de soporte de mantenimiento para poder tener una información general de las condiciones del equipo para poder ser atendido de manera oportuna, generalmente la decisión demanda un tiempo o responsabilidad de la empresa minera.

La Figura 73 expone un caso para el seguimiento de falla de modo manual, donde los registros son hechos cada vez que el personal especializado para el equipo para determinada prueba o toma de datos de las condiciones de funcionamiento de los equipos de carguío, ya sea de pala o cargador.

Figura 73

Reporte de seguimiento de condiciones de LT2350

CUADRO DE SEGUIMIENTO DE CONDICIONES													
FLOTA EQUIPO FECHA ACTUALIZACIÓN													
EQUIPO	FECHA DE OBSERVACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA CONDICIÓN	CRITICIDAD	ACTIVIDADES REALIZADAS	ACTIVIDADES PENDIENTES	ESTADO DE CONDICIÓN	BACKLOG KMC?	MECÁNICO O ELÉCTRICO?	NECESITA REPUESTO?	CUENTA CON OT MCP?	ESTADO OT MCP?	ESTADO DE REPUESTOS?	FECHA ESTIMADA DE EJECUCIÓN
CD103	17/01/2023	Motor M4, se encuentra trabajando con un convertidor IGBT Maestro	Medio		Realizar cambio de cables de tarjeta de convertidor maestro M4 hacia motor M4. cambiar convertidor.	Cerrado	No	Mecánico	Si	//	//	//	11/05/2023
CD103	19/01/2023	Fuga por testigo de bomba de baja (refrigerante)	Alto	Limpieza de resumen. Se realizó cambio de motor MTU.	Cambio de bomba	Cerrado	Si	Mecánico	Si				1/02/2023
CD103	19/01/2023	Manija de apertura de puerta izquierda de cabina no abre	Bajo	Se realizó mantenimiento, manija queda operativo	Cambiar manija	Cerrado	No	Mecánico	Si				1/02/2023
CD103	20/01/2023	Resumen de aceite por bloque de cilindro de levante lado vástago RH y LH	Alto	Se corrigió fuga de aceite.	cambio de sellos y pernos de bloque de cilindros de levante LH y RH, ambos lado	Cerrado	Si	Mecánico	Si				1/02/2023
CD103	20/01/2023	Fuga de aceite entre bombas tandem	Alto	Limpieza de resumen	Cambio de sello entre bomba #3 y bomba de dirección	Cerrado	Si	Mecánico	Si	pendiente	//	//	11/05/2023
CD103	23/01/2023	Desgaste prematuro de los stop block	Medio	Se calibró altura de stop block	Regulación de altura de los	Cerrado	Si	Mecánico	Si	pendiente			2/02/2023
CD103	23/01/2023	Cable de potencia con bajo aislamiento. Motor M4 habilitado al 50%	Medio		Cambio de cable de potencia	Cerrado	Si	Eléctrico	Si	PO 7000055137/00010	Procesado	//	11/05/2023
CD103	16/02/2023	Tapas de pin "D" (LH y RH) se encuentran desplazadas de su posición	Medio	22/04 se realiza el cambio de bellcrank, se corrige condición LH.	Extracción de pin y bushing, y volver a instalar	Cerrado	Si	Mecánico	No	7131329	Procesado	//	11/06/2023
CD103	17/02/2023	Fuga de aceite por manómetro de bomba de grasa	Bajo		Cambiar manómetro.	Cerrado	No	Mecánico	Si				
CD103	18/02/2023	Rotura de perno de tapa hidráulica	Bajo		Cambio de pernos y oring de tapa de tanque hidráulico	Cerrado	22/02/2023	Mecánico	Si	7131328	24/02/2023	R4248986 (2/2) R0808476 (21/24) R0753123 (75/24) R4182773 (1/1)	2-Sep-2023
CD103	26/02/2023	Fuga por mando final Pos. 3	Alto		Cambio de mando final pos. 3	Cerrado	Si	Mecánico	Si	pendiente			
CD103	26/02/2023	Velocidad excesiva de ventilador de radiador	Alto	26/02 Se cambió sensor de velocidad del fan, queda pendiente el cambio de cable RFM1 - J1	Cambio de sensor de velocidad	Cerrado	Si	Eléctrico	Si	//	//	//	26-Feb-23
CD103	28/02/2023	Fuga por mando final Pos. 1	Alto		Se verifico con videoescopio y se observa fuga por	Cerrado	pendiente	Mecánico	Si	pendiente	//	//	11/05/2023
CD103	11/03/2023	Cambio de vidrio RH de cabina	Alto		Realizar el cambio de vidrio.	Cerrado	No	Mecánico	Si	7132073	Procesado 11/03/2023	//	//
CD103	14/03/2023	Cambio de acople flexible ducto de escape.	Bajo		Cambio de acople flexible ducto de escape.	Cerrado	Si	Mecánico	Si	7132302			
CD103	14/03/2023	Cambio de manguera hacia válvulas de pulso.	Alto		Cambio de manguera hacia válvulas de pulso.	Cerrado	Si	Mecánico	Si	7132307	Procesado 14/03/2023	//	11/05/2023
CD103	14/03/2023	Cambio de cable EIC1	Alto	Se realizó el cambio de cable EIC1	Cambio de cable EIC1	Cerrado	Si	Eléctrico	Si	7132300	Procesado	stock en mina	Prox. PM
CD103	19/03/2023	Fuga de aceite hidráulico por filtro de recirculación de PTO LH	Medio		Cambio de sello de filtro	Cerrado	No	Mecánico	Si	pendiente			
CD103	20/03/2023	Fuga de aceite por bloque espaciador de bomba #1, deformación de asiento del sello	Alto		Cambio de bloque espaciador de bomba #1	Cerrado	Si	Mecánico	Si	pendiente MCP	//	//	11/05/2023
CD103	20/03/2023	Fuga por manguera metálica del compresor de aire	Alto	Manguera cambiada por opción disponible de Mantenimiento Mina	Reponer manguera para stock	Cerrado	Si	Mecánico	Si	//	//	//	19-Mar-23
CD103	20/03/2023	Rodamiento de generador registra 48°C	Alto		Medir alineamiento generador-PTO, engrase de rodamiento	Cerrado	No	Mecánico	Si	pendiente			
CD103	21/03/2023	Parabrisa delantero en cabina del operador, con fisura.	Medio		Cambiar parabrisas	Cerrado	26/04/2023	Mecánico	Si	7134571	26/04/2023	R4268522 (0/1) R4279016 (0/1)	por confirmar (6h)
CD103	21/03/2023	Fuga de aceite hidráulico por regulador de bomba de dirección	Medio		Cambio de sello	Cerrado	No	Mecánico	Si	No			

Nota. Tomado de los reportes de especialistas de determinada marca de Cargadores en una mina de tajo abierto (2023)

Entonces la problemática identificada en este punto es que se demanda presencia de especialista en mina para varias actividades que se puede realizar mediante la intervención de la ayuda o aplicación de RVA, mediante el cual se puede ahorrar horas hombre de especialistas en campo y todos los demás gastos colaterales al servicio propio de la atención de los equipos.

Los beneficios verificados derivados de la aplicación de tecnologías de realidad virtual y aumentada en las labores de mantenimiento y reparación de palas y cargadores incluyen:

- Reducción en cantidad de errores humanos que puede surgir
- Mayor rapidez en la ejecución, con tasas de reparación aceleradas
- Mayor productividad en carguío de camiones y movimiento a otros frentes
- Menor tiempo de indisponibilidad del equipo e inactividad general de las operaciones.
- Reducción del tiempo dedicado a la búsqueda de información y planos
- Mejora en el entrenamiento del personal mecánico-eléctrico, ya que se podría crear aplicaciones dentro de la plataforma del RVA para contener procedimientos (actualizables),
- Será posible ingresar al historial del equipo, teniendo disponible el estado de los componentes, se podrá contemplar los registros de revisión y la competencia para recibir alertas preventivas próximas a su fecha predeterminada, además de recibir notificaciones acerca de la temperatura o el desgaste de sus elementos.
- Facilita la identificación (customizado), etiquetado virtual, de cada uno de los elementos de los componentes mecánicos y eléctricos
- Permite comparar y comprobar condiciones de cualquier sistema y sus componentes, desde un periodo anterior a la fecha, modificar ese estado para eventuales inspecciones, inventarios, informes y reparaciones.
- Facilita eludir los peligros asociados con llevar a cabo revisiones y reparaciones en áreas de riesgo, posibilita la identificación de amenazas, sus riesgos y los controles apropiados para prevenir accidentes al personal, la maquinaria o el entorno.

En la siguiente Tabla 11 se muestra la diferenciación de un mantenimiento tradicional y un mantenimiento con industria 4.0 en el enfoque de Realidad Virtual Aumentada.

Tabla 11*Mantenimiento tradicional versus Mantenimiento 4.0- Soporte con RVA*

Mantenimiento tradicional	Mantenimiento i 4.0
Reparaciones especializadas de equipos críticos	Soporte remoto con RVA
<p>El especialista o representante especialista del fabricante debe viajar hacia la mina y poder interactuar, inspeccionar, analizar, observar el modo de falla y poder realizar pruebas para dar solución al equipo, perdiendo tiempo y teniendo en “espera” al equipo en falla.</p>	<p>El soporte se realiza a nivel remoto desde cualquier lugar del mundo utilizando RVA, con la opción de poder hacer que el especialista interactúe con la máquina o equipo en falla.</p> <p>El tiempo de atención al equipo es prácticamente de manera inmediata por parte del especialista o fabricante, para analizar, observar y realiza pruebas al equipo.</p>

2.2.5. Mantenimiento predictivo-prescriptivo con Big Data

A la fecha se tiene un área de mantenimiento predictivo y confiabilidad de mantenimiento de mina el cual está enfocado en realizar monitoreo de condiciones de los componentes principales de cargadores y palas, pero sus recursos y alcances son limitados, ya que sus actividades tienen limitaciones de equipamiento para cada tipo de componentes, frecuentemente se necesita de un servicio especializado y servicio de fabricante o su representante, así como de los *dealers* de marca.

La aplicación de tecnología de *Big Data* en el mantenimiento predictivo-prescriptivo es viable y factible. Los datos requeridos de los cargadores y palas, para decisiones críticas e informes, deben ser recopilados, evaluados y analizados con alto grado de calidad, con estricto rigor y precisión. En las plataformas modernas del IoT, cuando se trata de monitoreo de salud y análisis predictivo de los equipos, los datos se almacenan y procesan de la siguiente manera:

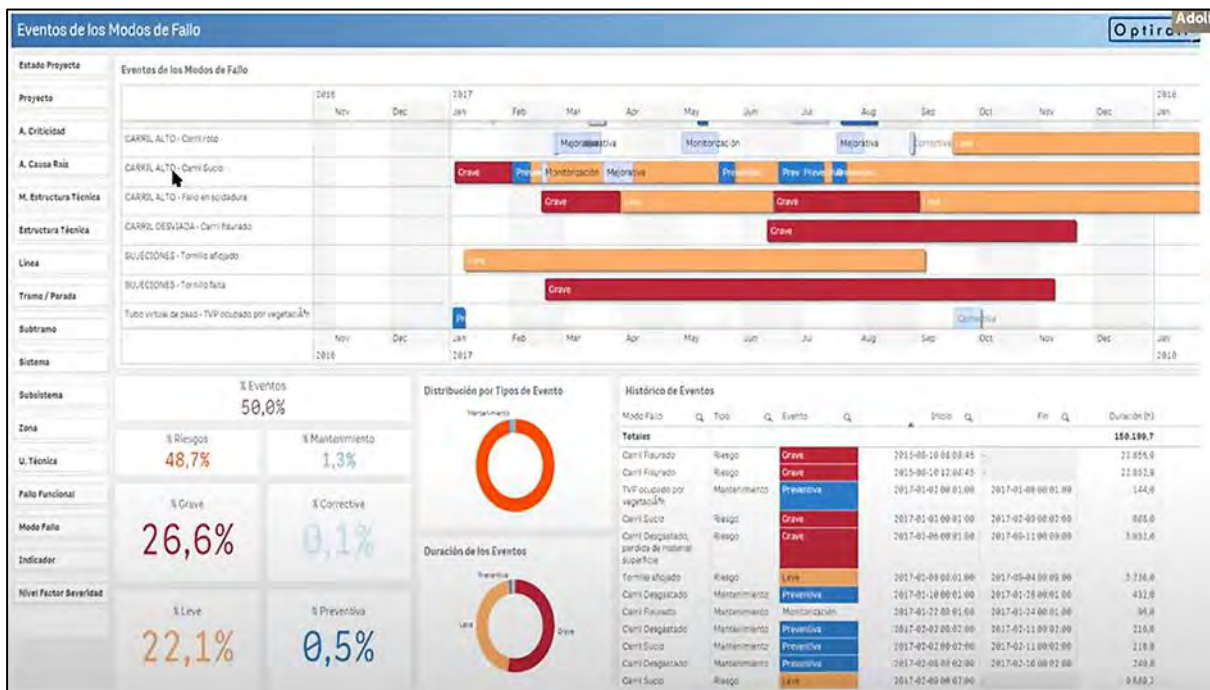
- Tienen un volumen demasiado grande
- Con muy alta velocidad y variabilidad
- Baja veracidad (alto ruido), con variedad alta y/o diversa
- Análisis de agregación compleja
- Consulta y análisis multidimensional

- Examen de datos registrado
- Evaluación de la corriente de datos mediante ventanas temporales
- Procesamiento de sucesos de naturaleza compleja

Mediante la aplicación de *Big Data* y *el Machine Learning* se podrá generar un mantenimiento predictivo inteligente ya que los datos e información tendrán las siguientes capacidades: capacidad de identificación, capacidad de detección, computación y comunicación que permiten capacidad de desarrollar razonamiento y capacidad de hacer seguimiento de su historia, con ello, los datos e información generados podrán desarrollar aprendizaje continuo y adquirir su propia inteligencia.

Es así como en la siguiente Figura 76. se muestra una plataforma desarrollada por una empresa de plataforma de soluciones con *Big Data* y *Machine Learning* para el seguimiento en línea de los eventos de modos de falla para un sistema de trenes, esta solución es posible adoptarlo para su aplicación a cargadores y palas.

Figura 76
Eventos de los modos de falla



Nota. Tomado de Parra (2021)

Entonces el modelo básico para la analítica predictiva de palas y cargadores estaría bajo la lógica de una secuencia de análisis de datos que se expone en la Figura 77, donde se identifica que el alto valor para la organización, bajo el contexto del valor de los datos e información, es la prescripción de falla de manera anticipada.

Figura 77

Relación de valor y complejidad respecto a mantenimiento



Nota. Tomado de Pérez (2019)

En función a lo indicado, se adapta para el caso de análisis de datos e información de palas y cargadores en una línea o secuencia desde lo descriptivo a lo prescriptivo, para ordenar, integrar, centralizar la información a través de la sensorización y la aplicación de *Big Data* y *Machine Learning* mediante una plataforma de análisis de modos de falla (ver figura 78).

Figura 78

Análisis de información para Mantenimiento con herramientas de la industria 4.0



Un orden sencillo de manejo de información se muestra en la Figura 79, bajo el cual se desarrollaría el algoritmo de alimentación de datos de campo hacia el sistema principal de *Big Data* y *Machine Learning*.

Figura 79

Flujo de datos de con Big Data y Machine learning



Nota. Tomado de Emerson (2020)

En la siguiente Tabla 12, detalla la diferenciación entre un mantenimiento tradicional y un mantenimiento con industria 4.0 con el enfoque de *Big Data* predictivo-prescriptivo.

Tabla 12

Mantenimiento tradicional vs Mantenimiento 4.0- Big Data predictivo- prescriptivo

Mantenimiento tradicional	Mantenimiento i 4.0
Mantenimiento Predictivo	<i>Big Data</i> – Predictivo - Prescriptivo
<p>El especialista realiza en forma presencial, en los equipos, en los puntos de medición: vibraciones, termografía, velocidad, etc.</p> <p>Los equipos de medición y/o monitoreo deben estar cargados, con baterías y disponibles para su utilización, siempre se corre el riesgo de no poder recopilar toda la información necesaria para un análisis y diagnóstico del equipo a intervenir.</p>	<p>Análisis de datos a nivel descriptivo, diagnóstico, predicción y prescriptivo.</p> <p>Se puede implementar plataformas:</p> <p><i>PdM Machines:</i> listado de todas las máquinas cuya información puede interactuar.</p> <p><i>PdM Errores:</i> mapeo de todos los modos de falla funcional y falla potencial. La información revela el momento en que uno de los sensores de las máquinas ha identificado una anomalía sin que la maquinaria haya experimentado una interrupción. Ofrece la fecha y hora exactas en que se detectó la irregularidad, junto con detalles específicos sobre la máquina afectada y el código asociado al error.</p> <p><i>PdM Mantenimiento:</i> Engloba las operaciones de mantenimiento llevadas a cabo para cada máquina y componente, ya sea como resultado de inconvenientes o anomalías, así como por acciones preventivas de mantenimiento.</p>

PdM_Fallas: Detecta para cada máquina la cronología exacta en la cual ha surgido una anomalía que resultó en la interrupción de la producción, especificando el elemento que ha experimentado el fallo.

PdM_Telemetría: se refiere a la información adquirida en tiempo real de los diversos sensores incorporados en cada máquina, destacando la marca temporal, la identificación única de la máquina, y registrando datos específicos como voltajes, recuentos de revoluciones, presiones y niveles de vibración.

2.3. Recopilación datos de campo de equipos de carguío

Para el planteamiento del nuevo modelo de gestión de mantenimiento de palas y cargadores bajo el enfoque de mantenimiento con industria 4.0, se debe realizar una estructuración de la recopilación de datos de campo de los equipos de carguío que deben tener los siguientes parámetros que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

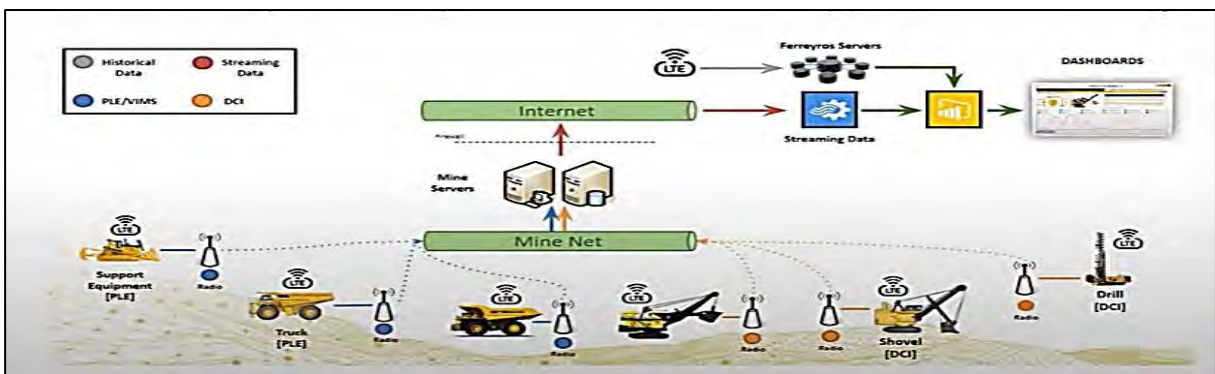
Parámetros para la recopilación de datos

Datos del equipo	Datos de componentes	Datos e información de sensores	Intervenciones de PM, PdM y Overhaul-Reparaciones
Geolocalización		clasificación de tipo, modelo y ubicación del sensor.	
Marca, modelo, tipo, capacidad,	A Qué sistema pertenece (motor, hidráulico, transmisión, levante, traslación)	Identificación de los sensores según su aplicación (termografía, vibración, flujo, presión, corriente, acústico/sonido, nivel, velocidad, <i>limit switches</i> , encoders, velocidad cero, otros)	Planes de mantenimiento. Planes y/o rutas de inspección
Número de carguíos por hora			
Tiempo de espera para cargar.	Tiempos frecuencia (horas) de cambio.		<i>Troubleshooting</i> de fallas y alarmas según manual de operación y mantenimiento
Localización del próximo frente de trabajo/carguío	Última fecha de cambio del componente.	Valores de operación.	Mantenimiento, pruebas y contraste de los sensores, fichas técnicas de MTTR y MTBF.
Datos del operador / experiencia.	Modos de falla en función al <i>troubleshooting</i> del fabricante.	Valores seteados en alarma y <i>trip</i> (falla).	
Ultimo mantenimiento.		Valores de <i>delay</i> (demora) de la señal, para cada tipo de componente.	

A la fecha los *Dealer* y/o fabricantes de los equipos de carguío vienen desarrollando e implementado sistemas o interfaces para leer o disponer de los datos de funcionamiento del equipo y sus sensores colocados a cada tipo de sistema-componente crítico según el diseño y concepción del cargador o la pala, Lincs y Daris para equipos Komatsu y Caterpillar respectivamente.

En la Figura 80 se muestra lo que administran de manera propia los *dealer* o fabricantes de manera independiente, no integrado al sistema de control de la empresa minera, en relación con geolocalización de equipos de carguío.

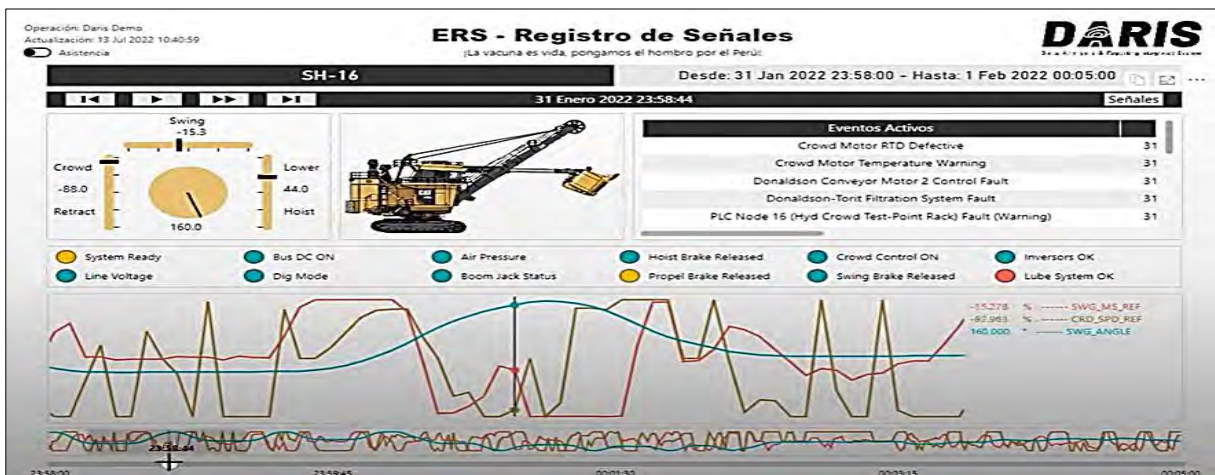
Figura 80
Geolocalización de equipos en mina de bajo abierto



Nota. Tomado de <https://www.ferreyros.com.pe/tecnologia/conectividad/daris/>

En la Figura 81, se muestra lo que administran de manera propia los *dealer* o fabricantes de manera independiente, no integrado al sistema de control de la empresa minera, en relación con registro de señales.

Figura 81
Registro de señales para equipos CAT- DARIS



Nota. Tomado de <https://www.ferreyros.com.pe/tecnologia/conectividad/daris/>

En la Figura 82 se muestra lo que administran de manera propia los *dealer* o fabricantes de manera independiente, no integrado al sistema de control de la empresa minera, en relación con sistema de monitoreo y control de señales importantes para el fabricante.

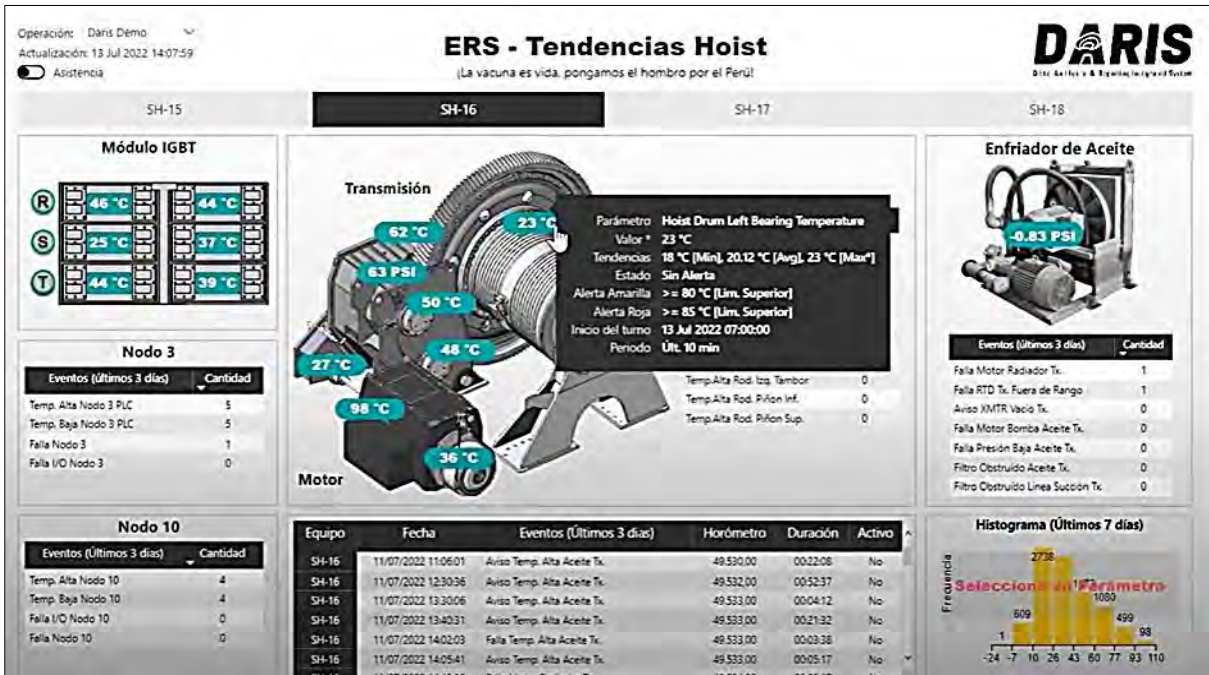
Figura 82
Sistema de monitoreo de los Dealer o fabricantes



Nota. Tomado de <https://komatsu.pe/index.php/monitoreo-komtrax/komtrax-movil>

En la Figura 83 se muestra lo que administran de manera propia los *dealer* o fabricantes de manera independiente, no integrado al sistema de control de la empresa minera, con relación al sistema de monitoreo y tendencias que se realiza por el fabricante (en su propio sistema).

Figura 83
Sistema de monitoreo Daris

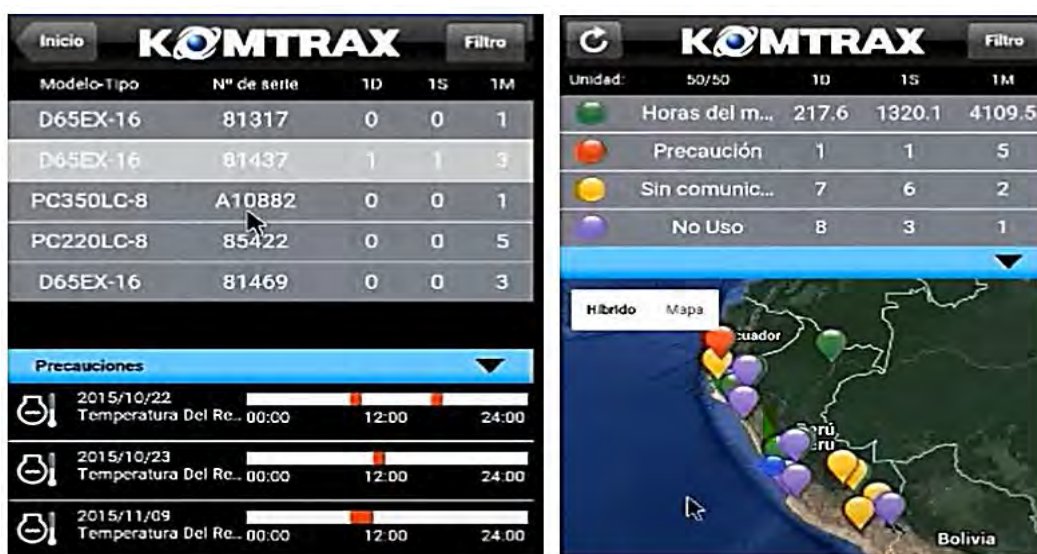


Nota. Tomado de <https://www.ferreyros.com.pe/tecnologia/conectividad/daris/>

En la Figura 84 se muestra lo que administran de manera propia los *dealer* o fabricantes de manera independiente, no integrado al sistema de control de la empresa minera, en relación con estados de utilización de equipos con información de estados de comunicación (en su propio sistema).

Figura 84

Kontrax sistema de monitoreo para equipos Komatsu

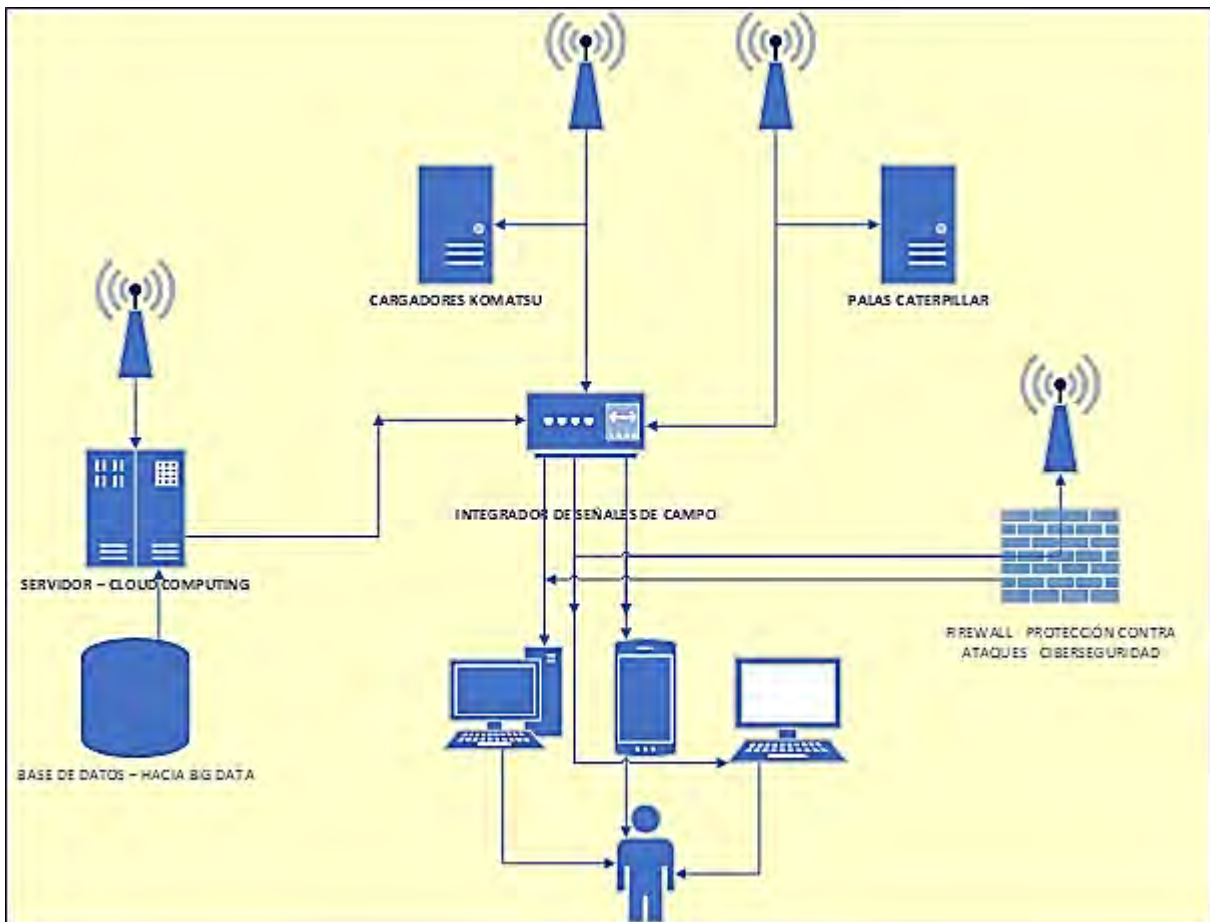


Nota. Tomado <https://komatsu.pe/index.php/monitoreo-komtrax/komtrax-movil>

En base a la caracterización de los modos de recopilación de datos existentes por parte de los fabricantes y/o *dealers* para cada tipo y modelo de equipos de carguío, se observa e identifica la factibilidad y viabilidad de su mejora y correspondiente implementación, y poderlos integrar a un sistema personalizado o al diseño del nuevo sistema de mantenimiento y gestión de activos bajo los principios y líneas de la transformación digital y adopción de herramientas de la tecnología industria 4.0. En la Figura 85 se revela un diseño de integración de información y datos en diferentes plataformas que conforman industria 4.0 para poder procesarlos mediante la aplicación de *Big Data* y *Machine Learning* y llegar al personal de mantenimiento con la información precisa de identificación de la funcionalidad, potencial de falla funcional y/o falla que presenta determinado equipo con todas sus características (patrones), histórico, modo y efecto de falla, el cómo solucionarlo, el mapeo de recursos-repuestos disponibles para resolver un, “problema-falla” o potencial inoperatividad de determinado equipo.

Figura 85

Integración de recopilación de datos e información de equipos de carguío.



2.4. Procesamiento de datos y emisión de información

El procesamiento de datos e información, utilizando las herramientas de la tecnología de la industria 4.0 se realizará de manera lógica y estructurada. Esto se ajustará según el sistema o componente específico que se esté analizando y diagnosticando. Posteriormente, se elaborará una ficha analítica predictiva para la intervención, contemplando aspectos como mantenimiento, estado de cambio de repuestos, el número de actividades programadas para el próximo mantenimiento, la salud de los componentes, alarmas y estado de cada uno de los sensores en cada uno de los sistemas y componentes principales.

La Tabla 14 presenta un análisis detallado de los alcances factibles y viables que pueden lograrse mediante el procesamiento de datos e información, haciendo uso de herramientas de tecnología de la industria 4.0. Este análisis se fundamenta en los avances alcanzados hasta la fecha, especialmente en lo que respecta a la facilitación de sistemas de monitoreo desde la etapa de diseño por parte de fabricantes y/o distribuidores de equipos de carguío.

Tabla 14*Gestión de mantenimiento utilizado Industria. 4.0*

Descripción	Análisis					Excelencia Operacional
	Análisis en tiempo real	Análisis Descriptivo	Análisis de Diagnóstico	Análisis Predictivo	Análisis prescriptivo	
Identificación de Equipo sistema de Palas y Cargadores	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Acceso a sistemas de monitoreo de <i>dealers</i> y fabricantes	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Reporte Automático Diario	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Soporte Remoto-Conectividad	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Reporte de malas prácticas operacionales	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si
Alarmas - Alertas y avisos de condiciones irregulares de los componentes	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si
Notificación de parámetros críticos de cada componente: Vibración, corriente, sonido, temperatura, presión.	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si Con Industria 4.0	Si
Auditorias operacionales	Si Con	Si Con	Si Con	Si Con	Si Con	Si

Descripción	Análisis					Excelencia Operacional
	Análisis en tiempo real	Análisis Descriptivo	Análisis de Diagnóstico	Análisis Predictivo	Análisis prescriptivo	
Evolución del mantenimiento	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	Si
	Si	Si	Si	Si	Si	
	Con	Con	Con	Con	Con	
	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	
	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	Industria 4.0	

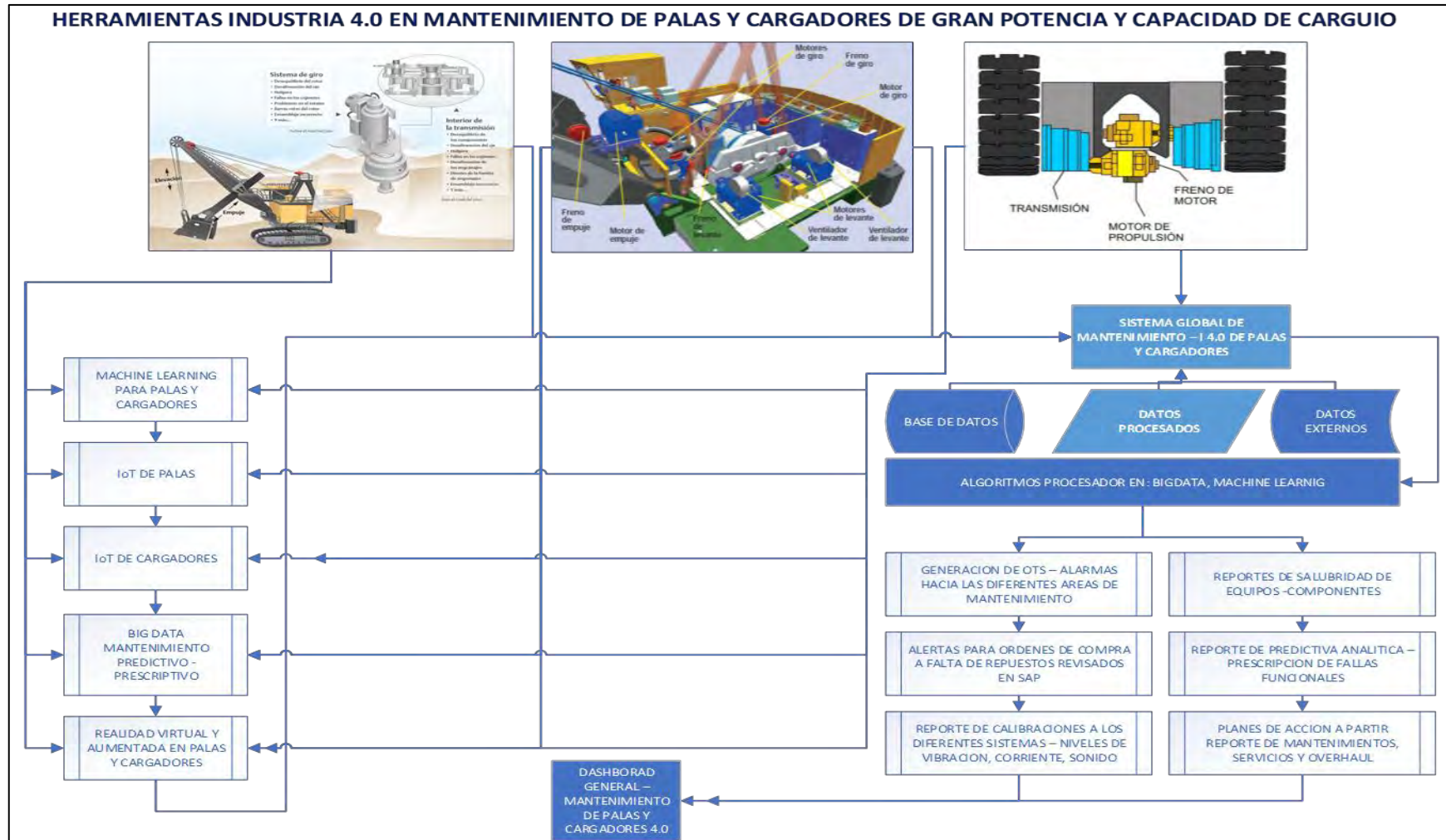
Nota. Adaptado en base cuadros de desempeño de mantenibilidad por diseño de fabricantes.

En la siguiente Figura 86. se muestra un diagrama de flujo de datos e información, y sus puntos de procesamiento bajo un contexto de utilización de herramientas de la tecnología industria 4.0, se puede considerar como un diseño base para la implementación y desarrollo del nuevo modelo de gestión de mantenimiento y gestión de activos enfocado en equipos de carguío en la empresa minera de tajo abierto.

En resumen, se detallan los procesos fundamentales para tener en cuenta para el procesamiento de información basada en datos recopilados en campo mediante sensorización y la aplicación de IoT. Los datos e información resultantes de estos procesos, que actualmente se gestionan de manera "manual" mediante algoritmos de mantenimiento, confiabilidad, disponibilidad y seguridad, ofrecerán resultados concluyentes, precisos y útiles para el personal de mantenimiento en diversas especialidades.

Figura 86

Herramientas de la industria 4.0 para equipos de carguío



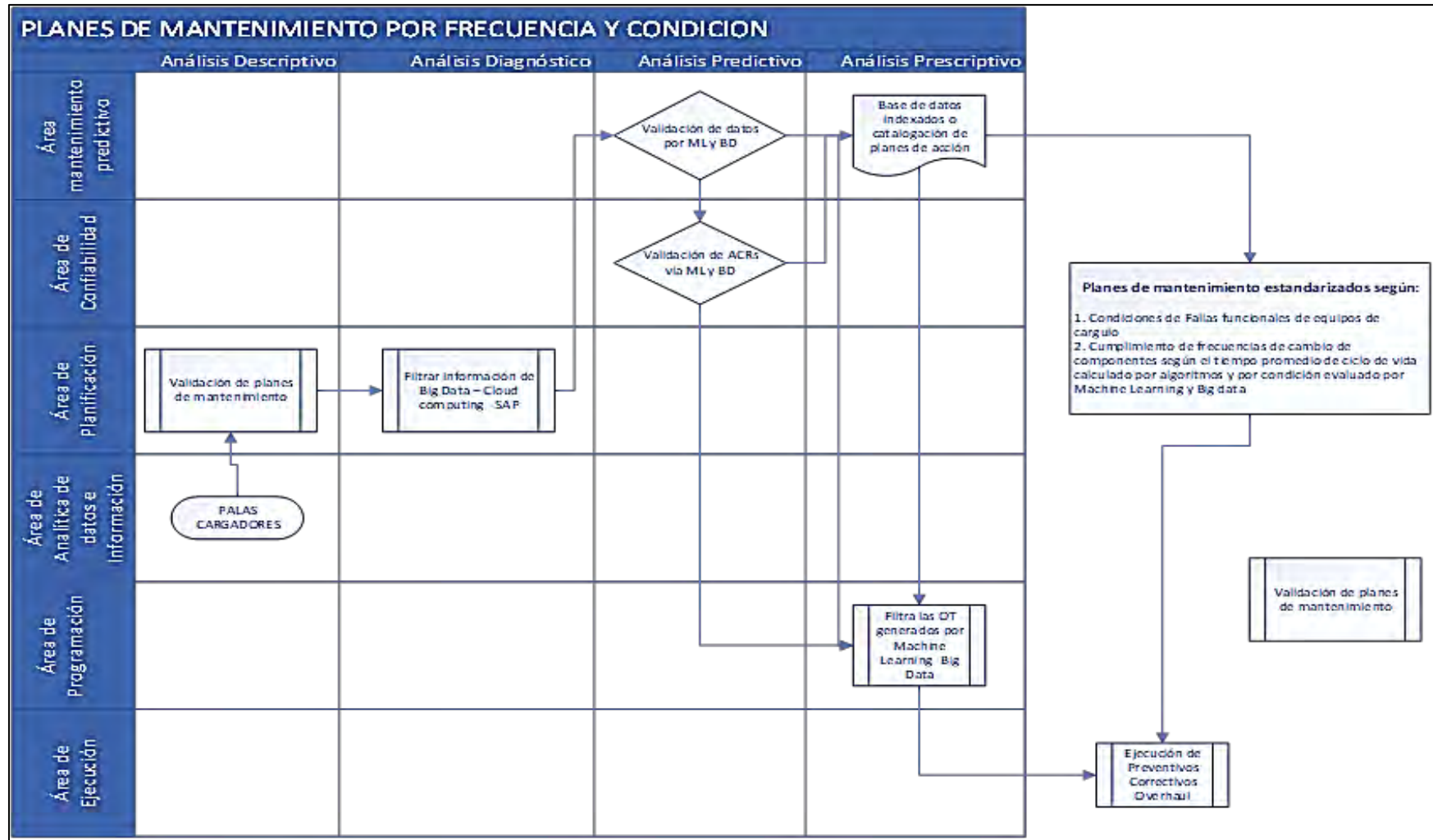
2.5. Planes de mantenimiento por frecuencia y condición

Como consecuencia de las acciones derivadas del previo procesamiento de datos e información en las plataformas del nuevo modelo de mantenimiento y gestión de activos, con el respaldo de herramientas de la industria 4.0, es imperativo realizar ajustes en los procesos actuales relacionados con los planes de mantenimiento por frecuencia y condición. Hasta la fecha, estos planes son generados por el área de confiabilidad y planeamiento, que se basa en benchmarking, buenas prácticas adoptadas de otras empresas o industrias, y recomendaciones proporcionadas por los fabricantes en sus manuales de operación y mantenimiento. Sin embargo, un elemento crítico para lograr un "desempeño ideal" está directamente vinculado al contexto operacional, el cual no ha sido completamente considerado en relación con la funcionalidad de todos los sistemas que son parte de los equipos de carguío. El contexto operacional y de utilización, es decir, la forma en que se opera el equipo en condiciones atmosféricas específicas (lluvias, nieve, temperaturas muy bajas) y condiciones de terreno variadas (lodo, alta polución, dureza del material a remover-cargar), difieren entre todas las empresas mineras (especialmente en minas de tajo abierto). Esta diversidad hace que cada componente presente características únicas de desgaste o funcionalidad. Por lo tanto, los enfoques actuales en cuanto a los planes de mantenimiento por frecuencia y condición carecen de la certeza necesaria para garantizar una alta confiabilidad y disponibilidad de los equipos, ya que no toman plenamente en cuenta las especificidades del entorno operacional y de utilización de cada componente.

Entonces las decisiones que se toman para generar los planes de mantenimiento por frecuencia y condición necesitan datos e información procesados y analizados de manera óptima considerando datos reales de campo al momento, al instante, justo a tiempo, en base a las condiciones de funcionalidad, estado de modos de fallas y efectos, potenciales fallas de componentes por degradación, desgaste, tiempo de uso y condiciones identificadas por sensorización; para todo lo indicado lo factible y viable es la implementación de herramientas de tecnología 4.0 es por ello que la siguiente Figura 87. se muestra un diseño básico del flujo de acciones o actividades por área de las disciplinas de mantenimiento teniendo como premisa el tipo de análisis e información a controlar.

Figura 87

Planes de mantenimiento por frecuencia y condición



2.6. Flujo de planeamiento con herramientas industria 4.0

El ciclo operativo de la gestión de mantenimiento y gestión de activos físicos, cargadores y palas, debe comenzar con una evaluación detallada del estado actual de los equipos críticos, permitiendo un *benchmarking* efectivo para el desarrollo de un plan robusto de defensa contra fallos. El paso crucial en la formulación del plan estratégico es la implementación de técnicas predictivas, también se debe considerar que las técnicas predictivas serán soporte muy importante para las actividades directas relacionadas con el planeamiento y la programación, proporcionando una visión mejorada mediante la generación de índices de rendimiento y el mejoramiento de los procesos de mantenimiento. El mantenimiento predictivo, dentro del marco de herramientas de industria 4.0, debe surgir como una etapa crítica, muy importante, facilitando la adquisición de datos precisos y su análisis profundo, culminando en la identificación exacta de las posibles fallas. Este procedimiento constituye el fundamento para una planificación estratégica de intervenciones optimizadas, la cual debe llevarse a cabo con precisión. Un examen minucioso de las causas fundamentales de las fallas impulsa una mejora continua, reiniciando el ciclo operativo y propiciando la evolución de la planificación estratégica a corto, mediano y largo plazo.

Entonces tomando en consideración importante los beneficios que trae consigo el implementar herramientas de industria 4.0 para conseguir un nuevo modelo de mantenimiento de palas y cargadores, a continuación se genera dos flujos de gestión de mantenimiento para poder diferenciar una de la otra, la primera, la Figura 88 muestra un flujo tradicional de gestión de mantenimiento enfocado a la importancia del planeamiento para con la disponibilidad operativa de los equipos, en donde se muestra los procesos de requerimiento de desempeño para los equipos de carguío, y en la Figura 89 se muestra un flujo de gestión de mantenimiento con características y propiedades de desarrollarse bajo las herramientas de tecnología de industria 4.0 en donde denotan el soporte y la mejoría que IoT, *Cloud computing*, *Big Data*, *Machine Learning* y RVA ofrecen al mantenimiento de equipos de carguío agregando valor a los procesos de planeamiento de mantenimiento con mayor confiabilidad, eficacia y eficiencia.

Figura 88

Planeamiento tradicional

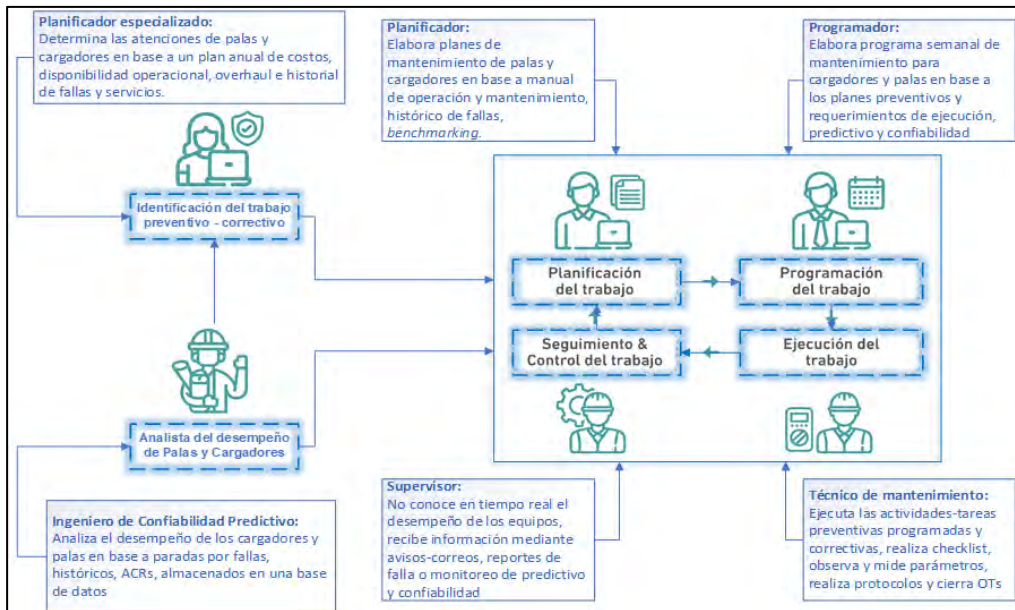
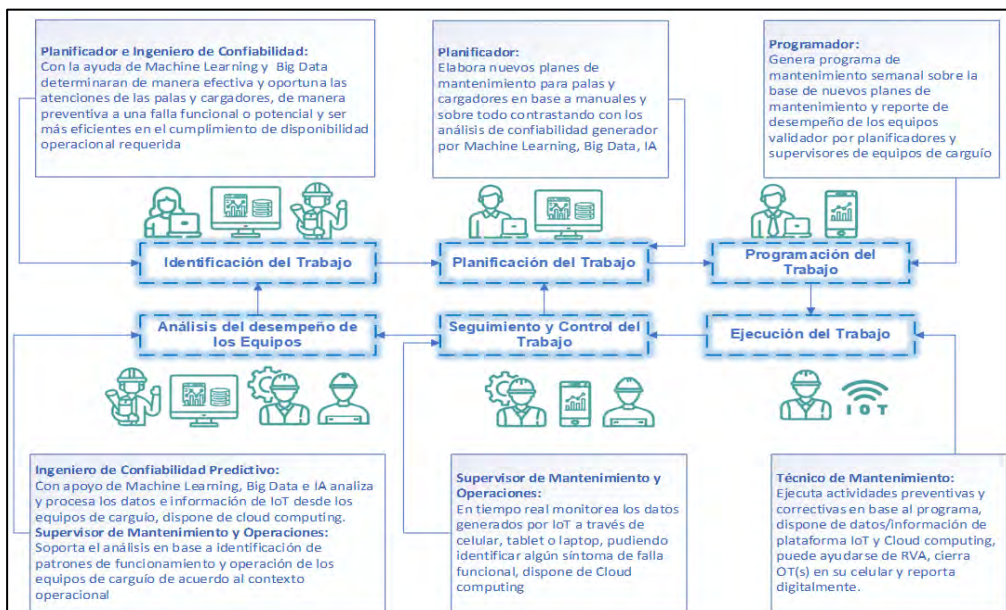


Figura 89

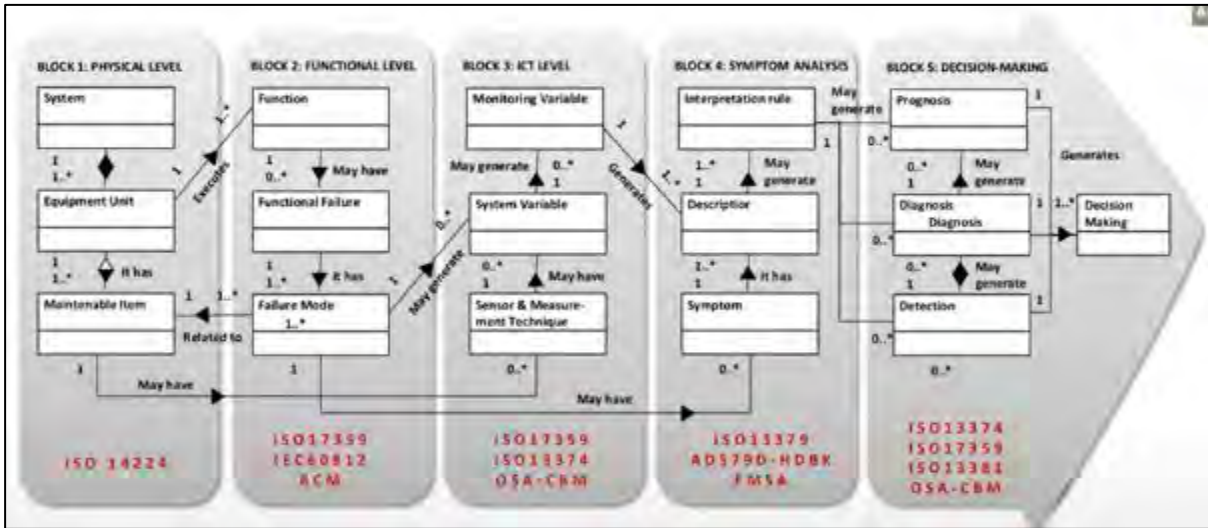
Planeamiento con industria 4.0 para requerimiento de desempeño de equipos



Por otro lado, para soportar el planeamiento de la atención preventiva y correctiva de los activos físicos de una mina, palas y cargadores, estructurado bajo la interacción de las herramientas de industria 4.0, se tendrá bien definido todas las normas que soportarán a las decisiones estratégicas para con las acciones que se deben tomar para cada tipo de equipo, en la siguiente Figura 90 expone un ejemplo de flujo de decisión utilizando cada una de las normas que rigen la gestión de activos y mantenimiento.

Figura 90

Interacción de normas de gestión de mantenimiento para industria 4.0



Nota. Tomado de Crespo (2020)

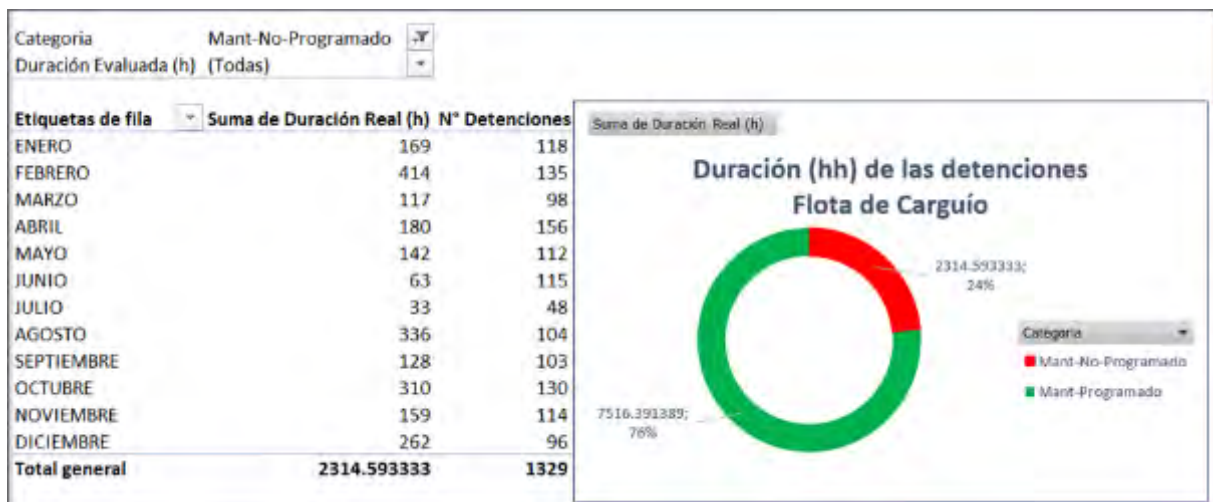
2.6.1. Análisis costo-beneficio con nuevo modelo de gestión de mantenimiento 4.0

En el punto 2.1.2 se tiene el detalle de los resultados de desempeño de la flota de carguío, entre palas y cargadores, en donde se detalla la cantidad de horas que la flota de carguío paró por temas de mantenimiento correctivo, mantenimiento no programado, cuyo tiempo de parada demanda un costo de reparación, además, el tiempo que para el equipo tiene un costo de producción, es decir lo que la empresa está perdiendo por no tener al equipo produciendo.

En la siguiente Figura 91, se detalla la cantidad de horas detenidas que reporta la flota de carguío y el número de detenciones.

Figura 91

Detenciones correctivas no programadas de la flota de carguío 2022



Así mismo se tienen datos de costos operativos por atender una falla o mantenimiento correctivo no programado del 2022 (ver tabla 15).

Tabla 15

Costos por mantenimiento correctivo no programado

Especialidad	Costo de mantenimiento correctivo no programado
Mecánica	\$ 2,093,096.59
Electricidad	\$ 210,450.97
Soldadura	\$ 111,662.16
Confiabilidad	\$ 96,805.74
Neumáticos	\$ 19,384.54
Total	\$ 2,531,400.00

Por fines de cálculo general, en base a que se indicó, en el punto 2.1.2, que el costo de producción de tener una pala detenida es de 130,000.00 USD y el costo de producción de tener un cargador detenido es de 40,000.00 USD, se tomará el promedio del costo promedio de tener un equipo de carguío parado por falla es de 85,000.00 USD, entonces realizando los cálculos se tiene la siguiente tabla de resultados.

En la siguiente Tabla 16 se muestra el detalle del cálculo realizado, en donde se observa que en total la empresa perdió una producción de 199, 271, 833.33 USD, aproximadamente una pérdida de 200 millones de USD por la inoperatividad de la flota de carguío.

Tabla 16

Resultados de pérdidas de producción por inoperatividad de flota de carguío 2022

Año 2022Año 2022 equipos carguío	Suma de duración real (h)	Número de detenciones no programadas- correctivos	Promedio de producción por tener 1 hora detenido una pala o cargador \$85,000.00	Costo de correctivos no programados del año 2022
Enero	169	118	\$ 14,354,516.7	
Febrero	414	135	\$ 35,230,526.7	\$ 2,531,400
Marzo	117	98	\$ 9,980,416.7	

Año 2022 Año 2022 equipos carguío	Suma de duración real (h)	Número de detenciones no programadas- correctivos	Promedio de producción por tener 1 hora detenido una pala o cargador \$85,000.00	Costo de correctivos no programados del año 2022
Abril	180	156	\$ 15,229,763.9	
Mayo	142	112	\$ 12,030,758.3	
Junio	63	115	\$ 5,315,144.4	
Julio	33	48	\$ 2,805,944.4	
Agosto	336	104	\$ 28,598,250.0	
Septiembre	128	103	\$ 10,895,370.8	
Octubre	310	130	\$ 26,386,762.5	
Noviembre	159	114	\$ 13,554,052.8	
Diciembre	262	96	\$ 22z,288,936.1	
Total, general	2315	1329	\$ 196,740,433.3	
Total, de pérdidas por falta de producción			\$ 199,271,833.3	

Ante el resultado obtenido, del análisis del costo de producción, se justifica que la ausencia de paradas en la flota de carguío, la minimización de fallos y la optimización de los tiempos de detención conducirían a una pérdida considerablemente menor. Se estima que, bajo supuestos de costos asociados a la implementación de la tecnología industria 4.0, con una inversión inicial de 50 millones de USD, sería factible reducir el tiempo total de paradas de 2315 horas a aproximadamente 50%, es decir, 1158 horas. Esta reducción representaría un ahorro sustancial en términos de pérdida por hora, valorada en 85,000.00 USD, lo que resultaría en un costo total de pérdida de producción de aproximadamente 98,430,000.00 USD. Así, con un total de pérdida alcanzando los 100,901,616.67 USD, se obtendría un ahorro aproximado del 49% con respecto al total inicial de 199,271,833.30 USD.

Este análisis básico justifica la viabilidad y factibilidad de la implementación y desarrollo de tecnología industria 4.0 en el mantenimiento de cargadores y palas en una mina de tajo abierto, considerando la significativa reducción en pérdidas proyectadas.

2.6.2. Optimización de tiempos de atención a equipos de carguío

Como se evidencia en los detalles del nuevo modelo de gestión de mantenimiento enfocado en la planificación, representado en la Figura 89, se aprecia una integración de herramientas de tecnología de la industria 4.0 en todos los actores involucrados en la gestión

de mantenimiento, específicamente en relación con el rendimiento de los activos, como palas y cargadores. En este contexto, se destaca la optimización del tiempo para acceder a información crucial en la toma de decisiones en cada fase del mantenimiento. Cada actor cuenta con datos e información detallada, que incluyen informes de condiciones, análisis de causas raíz y monitoreo de condiciones en tiempo real. Este enfoque abarca incluso el área de operaciones, permitiendo evaluar aspectos contextuales operacionales, funcionalidad y uso eficiente de la flota de carguío.

La mejora en la eficiencia temporal en la atención de los equipos de carguío, traduciéndose en un mayor tiempo de utilización operativa de palas y cargadores, se atribuye al impacto del uso de *IoT*, *Cloud Computing*, *Big Data*, *Machine Learning* y la RVA. Estas tecnologías contribuyen significativamente a reducir el tiempo de inoperatividad de los activos, y sus efectos se reflejan de manera positiva en los indicadores de disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad, costos y seguridad para el personal de mantenimiento.



Conclusiones

Los resultados del análisis de costos de producción respaldan la importancia de la integración de la tecnología Industria 4.0 en la mejora de los planes de mantenimiento predictivo para la flota de carguío en una mina de tajo abierto. La significativa reducción proyectada en el tiempo de paradas, respaldada por una inversión inicial, se traduce en un ahorro sustancial de aproximadamente el 49%. Este enfoque optimiza la eficiencia operativa, minimizando fallos y tiempos de detención, y demuestra un impacto financiero positivo, con un ahorro de aproximadamente 98,430,000.00 USD, marcando un avance estratégico claro hacia la eficiencia y rentabilidad en el sector minero.

La utilización y/o aplicación de la tecnología industria 4.0 en la gestión de activos y mantenimiento en el sector industrial minero es viable y factible, ya que se puede desarrollar iniciando por un piloto de transformación digital en determinado equipo o sistema de la planta concentradora o equipos de mina como de carguío o acarreo.

El mantenimiento predictivo a través de la sensorización e IoT, y el procesamiento de los datos en tiempo presente en función a los modos de falla ayuda a optimizar la atención temprana de los equipos enfocado en que la producción debe ser continua.

La planificación de mantenimiento preventivo y overhaul o servicio mayor a los equipos de carguío es más ordenado, eficiente y eficaz a través de la ayuda de información que se procesa en el CMMS-SAP en función a los datos que se ingresan con la ayuda de las herramientas de tecnología industria 4.0, así como la administración correcta y disponibilidad oportuna de los repuestos.

La disposición de datos de campo de manera inmediata se puede convertir en información precisa para diagnosticar el estado funcional de cualquier equipo, y si el estado funcional es contrastado con el análisis de modos de falla y la causa raíz de las fallas, es factible automatizar el seguimiento a la tendencia del ciclo de vida de los activos.

En el presente estudio fue posible integrar las herramientas de la tecnología industria 4.0 en cada una de las estrategias de gestión de activos y mantenimiento de los equipos de carguío en una mina de tajo abierto.

Los datos dispuestos en el presente estudio, ocurrencias de falla, tiempo de equipos de carguío indisponibles y la cuantificación o monetización de equipos parados, se pueden mejorar con la utilización de herramientas de tecnología industria 4.0, y los cálculos de MTTR, MTBF y confiabilidad de la flota de carguío se puede mejorar.

En el presente estudio se ha logrado mapear y estructurar lógicamente cada uno de los procesos de gestión de activos y mantenimiento en la flota de carguío con la adaptación de la utilización de las herramientas de tecnología industria 4.0, el mapeo ayuda de manera cualitativa y cuantitativa como alternativa.

Recomendaciones

Expandir la aplicación de las herramientas de tecnología industria 4.0 a todas las áreas que comprende una empresa del sector industrial minero de gran minería, de esa manera se puede alcanzar un desarrollo enfocado a minería digital, como parte de la innovación tecnológica del sector industrial.

El área de gestión de activos y mantenimiento de cualquier empresa puede ser considerado como área piloto para iniciar la estandarización, pruebas y ensayos de llevar a una estandarización global de uso de herramientas de tecnología industria 4.0 en todas las empresas mineras, ya se de mediana o gran minería.

Se requiere la formación y preparación del personal en aspectos relacionados con la tecnología de la industria 4.0 y la transformación digital, de modo que puedan contribuir de manera efectiva en la innovación de los procesos de mantenimiento en todas las áreas de desempeño, tales como los enfoques predictivo, preventivo y prescriptivo.

Las empresas mineras, las universidades y las empresas proveedoras de implementación de tecnología industria 4.0 debieran generar alianzas y/o convenios para acelerar el desarrollo de la transformación digital de Perú.

Es necesario que las empresas mineras consideren un presupuesto CAPEX y OPEX para la implementación y desarrollo de la transformación digital y la inteligencia artificial a través de la utilización de herramientas de tecnología 4.0.

Se hace imprescindible la incorporación de tecnología perteneciente a la industria 4.0, la cual propicia la mejora de la eficiencia en la utilización de recursos, generando economía de tiempo y reducción de costos asociados a la gestión de inventarios, repuestos y al rastreo del ciclo de vida de los activos.

Referencias

- ABB. (s.f.). *Oil and Gas Production Handbook*. Obtenido de <https://new.abb.com/oil-and-gas/production-book/utility>
- Acmplean. (20 de noviembre 2019). *AMFE, Artículo, Aseguramiento calidad*. Obtenido de <https://acmplean.com/el-manual-del-amfe-se-renueva/>
- Araneda, H, Navarro, G., Cid, V., Niklitschek, T., Águila, C., Barraza, J. (2021). *Fuerza laboral de mantenimiento en industria chilena: Estudio sobre características y evolución tecnológica*. Centro de Desarrollo Humano de Fundación Chile y financiado por la OTIC SOFOFA. Santiago, Chile.
- Arredondo, V. (2023). *La industria 4.0 y la transformación digital: Efecto sinérgico de la responsabilidad social corporativa y el capital humano en el marco de los objetivos de desarrollo del milenio*. Universidad Politécnica de Cartagena. España
- Brand, F. (6 de noviembre de 2023). *Maintenance decision-making process has changed. Machine Learning (hashtag#ML)*. LinkedIn. Obtenido de <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7121057458944425984/>
- Bucyrus. (2009). *Manual de Operadores-7495 Pala*. Bucyrus International, Inc.
- Cabeza, R. (2018). *Industria 4.0 y sus aplicaciones a la optimización de procesos y eficiencia energética*. Universidad de Sevilla, España.
- Castillo, A. (2019). *Mantenimiento prescriptivo RxM: Modelo de implementación*. Congreso Internacional de Mantenimiento y Confiabilidad. México
- Cat. (2015). *Manual de Operadores-7495 Pala Eléctrica de cables*. Caterpillar Global Mining LLC.
- Chaparro, J. (2020). *Evaluación del módulo de mantenimiento Enterprise Resource Planning ERP implementado en la armada nacional de Colombia usando el modelo Delone y Mclean, y basado en la percepción del usuario final*. Universidad EAN. Bogotá Colombia.
- Contreras, J. (2020). *Diseño de un modelo para mantenimiento predictivo en motores de inducción utilizando técnicas de la industria 4.0*. Universidad Tecnológica del Perú. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú.
- Crespo, A. (2020). *Modelo integral de confiabilidad y mantenimiento en la industria 4.0*. Universidad de Sevilla. España.
- Díaz, A. (2020). *Transformación Digital – Industria 4.0*. Colegio de Ingenieros de Chile A.G. Especialidad de computación e informática. Santiago, Chile.

- Díaz, J., García, J., Martínez, V. (2019). *Impact Analysis of Total Productive Maintenance – Critical Success factors and Benefits*. Springer Cham, Ciudad Juárez, Mexico
- Dueñas, L., Villegas, G., Castiblanco, S., Castaño, C. (2020). *Casos de éxito en la implementación del mantenimiento predictivo mediante el uso de tecnologías de la industria 4.0 en empresas colombianas*. Congreso Internacional de Sistemas. Bogotá, Colombia.
- Emerson. (2020) *Process Management. Plant Web Optics Analytics Overview*. Obtenido de <https://www.emerson.com/en-us/automation/actuador/valve-actuador-controllers-instruments-software>
- Ferrera, A. (2022). *Las Estrategias a seguir para elaborar un plan inicial de mantenimiento de una empresa*. Centro de especialización Predictiva. México
- Ferreiros. (s.f.). *Daris*. Obtenido de <https://www.ferreiros.com.pe/tecnologia/conectividad/daris/>
- García, J. A. (2018). *Propuesta de mejora en la gestión del mantenimiento para disminuir los tiempos perdidos en una fábrica de azúcar*. Universidad Privada del Norte. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Trujillo, Perú
- Gonzalez, D. (2019). *Tecnología de la industria 4.0 implementadas en la gestión de almacenes en Latinoamérica*. Universidad de Pamplona, Colombia.
- González, D. (2021). *Mantenimiento prescriptivo a partir de la predicción de eventos anómalos*. Universidad Oberta de Catalunya. España.
<https://fch.cl/wp-content/uploads/2021/07/Estudio-Mantenimiento4.0.pdf>
- IEC 60300-3-10:2001. (2001). *Gestión de la confiabilidad - Parte 3-10: Guía de aplicación - Mantenibilidad*. International Standar.
- ISO 14224:2016. (2016). *Industrias de Petróleo y Gas natural - Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos*. International Organization for Standardization.
- ISO 55000:2014. (2014). *Gestión de Activos- Aspectos generales, principios y terminología*. International Organization for Standardization.
- Komatsu. (2015). *Manual de Servicio-LT2350-2242*. LeTourneau Mining.
- Komatsu. (s.f.). *Komtrax Móvil*. Obtenido de <https://komatsu.pe/index.php/monitoreo-komtrax/komtrax-movil>
- Lizarraga, J. (2018). *Introducción a la industria 4.0: Conceptos básicos y ejemplos*. Mondragon Unibertsitatea, España.

- Maisueche, A. (2019). *Utilización de Machine Learning en la industria 4.0*. Universidad de Valladolid, Escuela de Maestría en Ingenierías Industriales. Valladolid, España. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/228074134.pdf>
- Maldonado, N. (2019). *Plan de Mantenimiento Basado en la metodología PMO: Optimización de planes de mantenimiento para incrementar la confiabilidad de la flota de camiones 797F de Minera Chinalco Perú*. Universidad Nacional del Callao, Unidad de post grado de la Facultad de Ingeniería y Energía. Callao-Lima, Perú.
- Marfán, M., Meller, P. (2019). *Estrategia industria 4.0: Diseñando el Chile futuro*. ASIMET – Consejo Minero. Santiago de Chile, Chile.
- Marquina, P. (2022). *Resultados del ranking de competitividad digital mundial 2022* – Centrum Think, Escuela de Buenos Negocios. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Marrero, R., Martínez, E., Vilalta, J., Basile, M. (2018). *La planificación del mantenimiento, su importancia en la gestión de los activos*. Universidad Tecnológica de La Habana. La Habana, Cuba
- MCP SA. (2023). *Reportes y Procedimientos área de Ingeniería & Mantenimiento*. Obtenido de <https://dashboard.chinalco.com.pe/reports/powerbi/GESTION%20DE%20ACTIVOS/PLANTA/GAP001%20-%20REPORTE%20ENTRENAMIENTO%20GDA>
- Mendoza, E. (2022). *Implementación de SAP PM para la gestión de mantenimiento del sistema de transmisión eléctrica CONENHUA*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos UNMSM. Lima, Perú.
- Mora, A. (2009). *Mantenimiento: Planeación, ejecución y control*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.
- Palacio, A. J. (2018). *Mejora del proceso de planificación de mantenimiento para equipamiento minero de gran envergadura utilizando el ciclo de gestión de riesgos*. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Ingeniería Mecánica. Valparaíso, Chile.
- Palmer. (2006). *Maintenance Planning and Scheduling Handbook*. McGraw-Hill. México.
- Paredes, F. (2023). *Mantenimiento Productivo Total TPM: Liderazgo e Implementación*. IMC © Instituto de Mejora Continua e Innovación. Lima, Perú.
- Parra, C. (2021). *Seminario modelo de gestión del mantenimiento y confiabilidad integrado a un proceso de activos (enfoque Industria 4.0)*. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Ingeniería Mecánica. Valparaíso, Chile.
- Peñata, H., Bolaños, C., Chimbi, J. (2021). *Integración de la Industria 4.0 en el Modelo de Gestión de Mantenimiento de una Empresa de Producción de Bebidas*. Dirección de

- Posgrados, Universidad ECCI, Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bogotá, Colombia.
- Pérez, R. (2019). *Métodos para el Análisis de Fallos y el uso del Big Data en la Industria 4.0*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Sevilla, España.
- Ponce, A. (2018). *Optimización del mantenimiento planeado en una línea de producción de bebidas carbonatadas*. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrico. Piura, Perú.
- Predyc. (06 de agosto de 2023). *Entre las ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo podemos mencionar las siguientes*. Obtenido de <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7096517101263151105/>
- SAE JA1011. (2009). *Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)*. International Standar
- SAE JA1012. (2009). *Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)*. International Standar
- Smith, R., Mobley, K. (2011). Rules of thumb for maintenance and reliability engineers
- SSAM. (2023). *Digital twin: Deepening the subject*. Obtenido de <https://ssammeducation.com/digital-twin-deepening-the-subject/>
- Sustainable Asset & Maintenance Management. (06m de julio 2023). *Recent advances and trends of predictive maintenance from data driven machine prognostics perspective*. Obtenido de 18.<https://images.app.goo.gl/dhVZyx3aiiapuv1R7>
- Suzuki (1995). TPM en Industrias de proceso. Madrid, España.
- Tavella, A. (2022). *Planificación y programación del mantenimiento preventivo anual para garantizar la sustentabilidad de las operaciones*. Universidad Austral, Facultad de Ingeniería, unidad de postgrado. Rosario, Argentina.
- Tume, M. G. (2022). *Estado del arte de la inteligencia artificial y su aplicación en el mantenimiento*. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.
- Turco, I. (2022). *Mantenimiento eléctrico con industria 4.0*. Mentory Capacitación y Consultoría. Lima, Perú
- Turner, S. (s.f). *Me enorgullece haber introducido cambios en la gestión de activos*. Predictiva 21. Obtenido de <https://predictiva21.com/steve-turner-cambios-gestion-activos/>
- UNE 13306:2017. (2017). *Terminología del Mantenimiento*. Asociación Española de Normalización.

- UNE EN 60300-3-3 2009. (2009). *Gestión de la confiabilidad. Parte Cálculo del Coste del Ciclo de Vida*. Asociación Española de Normalización.
- Val Roman, J. (2018). *Industria 4.0: La transformación digital de la industria*. Facultad de ingeniería de la Universidad de Deusto, España.
- Valencia, V. (2022). *Propuesta para incrementar la confiabilidad operacional usando técnicas RCM en palas eléctricas de cable 7495 Hydracrowd para una mina ubicada en Moquegua*. Universidad Católica de Santa María. Arequipa, Perú.
- Vásquez, J. (2019). *Implementación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM a excavadoras Caterpillar 336D2L*. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.
- Villegas, C. (14 de octubre de 2023). *Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) y su uso en Machine Learning aplicado a procesos productivos*. Predictiva 21. Obtenido de <https://predictiva21.com/analisis-modos-efectos-fallas-amef-machine-learning/>

