

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**Propuesta metodológica de un Sistema de Gestión de
Mantenimiento 4.0 orientado a la toma de decisiones
basadas en datos en plantas industriales**

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Gestión de la
Ingeniería
que presenta:

Wilber Pérez Sullcaray

Asesor:

Sandro Alberto Paz Collado

Lima, 2026

Informe de Similitud

Yo, Sandro Alberto Paz Collado, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis titulada(o) Propuesta metodológica de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 orientado a la toma de decisiones basadas en datos en plantas industriales, de el autor Wilber Pérez Sullcaray, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15/01/2026.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de investigación, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 15 de enero de 2026.

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Paz Collado, Sandro Alberto	
DNI: 06662686	Firma 
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5257-5373	

DEDICATORIA

A mi familia, por su constante respaldo, paciencia y motivación a lo largo de esta etapa académica.

A quienes me acompañaron con su orientación, respaldo técnico y profesional, así como, con su constante aliento y confianza a lo largo de este proceso.

Y especialmente, dedico esta tesis a todo el personal dedicados a la ingeniería & mantenimiento industrial, cuyo compromiso silencioso mantiene en marcha el corazón de la industria. Esta tesis es también para ustedes.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor de tesis Dr. Sandro Alberto Paz Collado, por su constante apoyo y por compartir sus conocimientos que han sido fundamentales.

A los docentes y asesores, por su orientación técnica y rigurosidad académica.

Al Departamento de Mantenimiento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas, de la Dirección de producción del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) que facilitó el acceso a información operativa, clave para validar esta propuesta en un entorno real.

Agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Perú, por brindar el soporte formativo y metodológico necesario para el desarrollo de esta tesis.

A mi familia, amigos y compañeros por su apoyo constante durante todo el proceso.



RESUMEN

En el contexto de la Industria 4.0, esta investigación desarrolla una propuesta metodológica de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) orientado a la toma de decisiones basadas en datos en plantas industriales. En una primera etapa, se analiza el impacto diferenciado de las tecnologías habilitadoras sobre la reducción de costos aplicando el método AHP para priorizar su contribución relativa. Los resultados destacan el carácter estratégico de los Sistemas Ciberfísicos y los Gemelos Digitales, así como el rol habilitador del IIoT y la Computación en la Nube dentro del ecosistema digital.

Posteriormente, se diseña una metodología para evaluar la madurez del sistema de mantenimiento mediante un Índice Global de Madurez y un diagnóstico multidimensional alineado con los lineamientos de la ISO 55001:2024, lo que permite identificar brechas para avanzar hacia el SGM 4.0.

El estudio integra estos resultados en un modelo metodológico que estructura el SGM 4.0 en torno a los ejes de contexto organizacional, liderazgo, planificación, soporte, operación y mejora, incorporando tecnologías 4.0 y evidencias documentadas que aseguran trazabilidad y sistema auditable. Finalmente, se desarrolla una arquitectura funcional de monitorización de condición y mantenimiento predictivo aplicado a un caso práctico.

En conjunto, la propuesta evidencia que la transición hacia un SGM 4.0 es viable, escalable y generadora de valor sostenible en la gestión de activos físicos.

Palabras clave: Industria 4.0, Mantenimiento 4.0, Gestión de activos físicos, Transformación digital, Toma de decisiones

ABSTRACT

In the context of Industry 4.0, this research develops a methodological proposal for a Maintenance Management System 4.0 (SGM 4.0) oriented toward data-driven decision-making in industrial plants. In an initial stage, the differentiated impact of enabling technologies on maintenance cost reduction is analyzed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to prioritize their relative contribution. The results highlight the strategic role of Cyber-Physical Systems and Digital Twins, as well as the enabling function of the Industrial Internet of Things (IIoT) and Cloud Computing within the digital ecosystem.

Subsequently, a methodology is designed to assess the maturity level of the maintenance system through a Global Maturity Index and a multidimensional diagnostic aligned with ISO 55001:2024 guidelines, enabling the identification of critical gaps for advancing toward SGM 4.0.

The study integrates these findings into a methodological model that structures the SGM 4.0 around the axes of organizational context, leadership, planning, support, operation, and improvement, incorporating Industry 4.0 technologies and documented evidence that ensures traceability and auditability of the system. Finally, a functional architecture for condition monitoring and predictive maintenance is developed and applied to a practical industrial case.

Overall, the proposed framework demonstrates that the transition toward an SGM 4.0 is feasible, scalable, and capable of generating sustainable value in physical asset management.

Keywords: Industry 4.0, Maintenance 4.0, Physical asset management, Digital transformation, Data-driven decision-making

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. Planteamiento del problema	2
1.1 Descripción de la problemática	2
2. Formulación del problema	4
2.1 Problema general	4
2.2 Problemas específicos.....	4
3. Objetivos	5
3.1 Objetivo general	5
3.2 Objetivos específicos	5
4. Hipótesis.....	5
4.1 Hipótesis general.....	5
4.2 Hipótesis específico	6
5. Estructura del documento	6
CAPÍTULO I	8
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL: MANTENIMIENTO EN EL CONTEXTO DE LA INDUSTRIA 4.0	8
1.1 Mantenimiento industrial: evolución y estrategias de mantenimiento	8
1.2 Industria 4.0 y su impacto en la gestión de activos físicos	12
1.3 Internet Industrial de las Cosas (IIoT) aplicado a mantenimiento 4.0	13
1.3.1 Hardware	13
1.3.2 Software	13
1.3.3 Protocolos de comunicación	16
1.3.4 Redes de comunicación aplicadas a IIOT	18
1.3.5 Ciberseguridad	18
1.3.6 Arquitectura IIOT en mantenimiento 4.0	19
1.4 Computación en la nube en mantenimiento 4.0	20
1.5 Big Data Analytics en mantenimiento 4.0.....	22
1.6 Sistemas Ciberfísicos (SFC) aplicados a mantenimiento 4.0	24
1.7 Realidad aumentada (RA) aplicada al mantenimiento 4.0.....	26
1.8 Gemelos Digitales (Digital Twins) aplicada al mantenimiento 4.0	28
1.9 Fabricación Aditiva (FA) aplicada al mantenimiento 4.0.....	30
1.10 Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0)	31

1.10.1	Concepto de Mantenimiento 4.0	31
1.10.2	Ventajas competitivas de la adopción de Mantenimiento 4.0	32
1.11	Modelos multicriterio para la toma de decisiones en mantenimiento.....	34
1.12	Modelos de madurez en la Industria 4.0	35
1.13	Indicadores clave de rendimiento (KPIs) en mantenimiento: fundamentos para medir desempeño	37
1.13.1	Marco conceptual de KPIs	38
1.14	Indicadores económicos y evaluación financiera en Mantenimiento 4.0	40
1.14.1	CAPEX y OPEX en mantenimiento.....	40
1.14.2	Cálculo de beneficios netos (BN), ROI y métricas de retorno	40
1.15	Normativas y estándares relacionados a sistema de gestión de mantenimiento	41
CAPÍTULO II		43
IMPACTO DE LAS TECNOLOGÍAS DE INDUSTRIA 4.0 EN EL MANTENIMIENTO DE ACTIVOS FÍSICOS		43
2.1	Evaluación de impacto de las tecnologías de industria 4.0 en el mantenimiento de activos físicos.....	43
2.1.1	Tecnologías evaluadas.....	43
2.1.2	Criterio de evaluación	44
2.1.3	Definición de escala de calificación	44
2.1.4	Consideraciones para definir el impacto inicial de cada tecnología.....	44
2.1.5	Construcción de la matriz de comparación por pares	45
2.1.6	Normalización de la matriz.....	48
2.1.7	Cálculo del vector de pesos.....	48
2.1.8	Verificación de consistencia.....	49
2.1.9	Resultado final.....	49
2.2	Metodología para el cálculo del beneficio económico neto	51
2.2.1	Metodología de cálculo del CAPEX	51
2.2.2	Metodología de cálculo del OPEX	52
2.2.3	Cálculo de beneficios netos (BN).....	52
2.2.4	Cálculo del retorno de la inversión (ROI)	53
CAPÍTULO III		55
METODOLOGIA DE ÍNDICE GLOBAL DE MADUREZ Y DIAGNÓSTICO DE MADUREZ PARA LA TRANSICIÓN AL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO 4.0		55

3.1	Metodología para el cálculo del Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM)	55
3.1.1	Dimensiones e indicadores	55
3.1.2	Cálculo de los factores	57
3.1.3	Pesos de cada dimensión (ψ)	61
3.1.4	Cálculo del Índice Global de Madurez (IGM)	62
3.1.5	Definición de rangos para los niveles de mantenimiento	62
3.2	Diagnóstico de madurez para la transición al Sistema Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0)	63
3.2.1	Definición de dimensiones y criterios	63
3.2.2	Evaluación y análisis de la madurez	65
CAPÍTULO IV		68
PROPUESTA METODOLÓGICA DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO 4.0 ORIENTADO A LA TOMA DE DECISIONES BASADAS EN DATOS		68
4.1	Propuesta metodológica para el análisis del contexto organizacional del SGM 4.0	68
4.1.1	Diagnóstico del entorno interno y externo	69
4.1.2	Identificación y análisis de partes interesadas	69
4.1.3	Delimitación del alcance físico, funcional y digital del SGM 4.0	70
4.1.4	Mapa estructural de procesos del SGM 4.0 e integración con procesos de apoyo	71
4.1.5	Integración de tecnologías habilitadoras para toma de decisiones basada en datos	74
4.1.6	Marco referencial para la toma de decisiones	76
4.2	Propuesta metodológica para establecer el liderazgo en el SGM 4.0	76
4.2.1	Alineación estratégica del SGM 4.0 con la organización	77
4.2.2	Política institucional de mantenimiento 4.0	77
4.2.3	Definición de roles, autoridad y responsabilidades	78
4.2.4	Provisión de recursos para transformación digital	78
4.2.5	Comunicación, revisión y participación activa de partes interesadas	78
4.3	Propuesta metodológica para la planificación estratégica del SGM 4.0	78
4.3.1	Identificación de riesgos y oportunidades en el SGM 4.0	79
4.3.2	Objetivos estratégicos SMART	80

4.3.3	Plan Estratégico de Gestión de activos Físicos (PEGAF) integrando el SGM 4.0	80
4.3.4	Integración de la planificación del SGM 4.0 con la gestión organizacional..	81
4.4	Propuesta metodológica para asegurar el soporte en el SGM 4.0	81
4.4.1	Gestión de recursos técnicos, humanos y financieros	82
4.4.2	Desarrollo de competencias	82
4.4.3	Generación de conciencia operativa.....	83
4.4.4	Estrategia de comunicación interna y externa.....	83
4.4.5	Gestión de información documentada	83
4.4.6	Gestión de datos e infraestructura analítica	84
4.4.7	Infraestructura tecnológica de soporte y ciberseguridad industrial	84
4.5	Propuesta metodológica para la operación del SGM 4.0	84
4.5.1	Gestión del ciclo de vida del activo	85
4.5.2	Planificación y control operacional.....	85
4.5.3	Control del cambio.....	87
4.5.4	Logística, compras y almacén	87
4.5.5	Gestión estratégica de servicios tercerizados	88
4.6	Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño del SGM 4.0.....	88
4.6.1	Seguimiento, medición, análisis y evaluación	89
4.6.2	Auditoría interna del SGM 4.0.....	90
4.6.3	Revisión por la Alta Dirección	91
4.6.4	Medición del valor generado.....	91
4.6.5	Benchmarking competitivo.....	92
4.7	Propuesta metodológica para la mejora del SGM 4.0	92
4.7.1	Mejora continua	92
4.7.2	Gestión sistemática de no conformidades y acción correctiva	93
4.7.3	Acción predictiva para mejora anticipada del sistema.....	93
CAPÍTULO V		96
DESARROLLO DE UNA ARQUITECTURA PARA LA MONITORIZACIÓN DE CONDICIÓN Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO ALINEADA CON LOS PRINCIPIOS DEL MANTENIMIENTO 4.0: CASO PRÁCTICO		96
5.1	Descripción del caso de estudio	96
5.2	Alcance y definición de objetivos SMART	100
5.2.1	Alcance.....	100

5.2.2	Objetivos	101
5.3	Arquitectura del modelo propuesto	103
5.3.1	Recopilación y transmisión de datos.....	103
5.3.2	Plataforma de computación en la nube.....	104
5.3.3	Big Data para Mantenimiento 4.0.....	105
5.3.4	Inteligencia Artificial (Machine Learning).....	105
5.3.5	Dashboards predictivos e indicadores clave en Power BI	109
5.3.6	Propuesta de Arquitectura SCADA para Smartphone o Tableta	110
5.3.7	Ciberseguridad en una Arquitectura de Mantenimiento 4.0.....	110
CONCLUSIONES.....		112
RECOMENDACIONES.....		116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		118
ANEXOS		123



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características de gateways IloT industriales	14
Tabla 2	Características de softwares CMMS utilizadas en mantenimiento	14
Tabla 3	Características de softwares SCADA utilizadas en la industria	15
Tabla 4	Características plataformas IIOT para adquisición de datos	16
Tabla 5	Características plataformas de análisis y visualización de datos	16
Tabla 6	Características de los principales protocolos de comunicación industrial.....	17
Tabla 7	Características de las principales redes comunicación industrial	18
Tabla 8	Ciberseguridad aplicada al IloT	19
Tabla 9	Valor agregado de la computación en la nube respecto al IIOT	22
Tabla 10	Valor agregado de la Big Data Analytics en mantenimiento 4.0	23
Tabla 11	Tecnologías de Big Data Analytics aplicado a la industria 4.0.....	24
Tabla 12	Valor agregado de los Sistemas Ciberfísicos (SFC) en mantenimiento 4.0.....	25
Tabla 13	Valor agregado de la Realidad Aumentada (RA) en mantenimiento 4.0	26
Tabla 14	Tecnologías de Realidad Aumentada (RA) utilizado en la industria 4.0	27
Tabla 15	Valor agregado de los Gemelos Digitales (Digital Twins) en Mantenimiento 4.0	28
Tabla 16	Tecnologías de Gemelos Digitales (Digital Twins) aplicado a la industria 4.0 ...	29
Tabla 17	Normativas y estándares relacionados a mantenimiento 4.0	36
Tabla 18	Normativas y estándares relacionados a mantenimiento 4.0	42
Tabla 19	Matriz de comparación por pares.....	48
Tabla 20	Matriz normalizada	48
Tabla 22	Clasificación del nivel de madurez del sistema de mantenimiento de la organización según el valor obtenido de IGM	62
Tabla 23	Inputs y Outputs de los procesos operativos.....	74
Tabla 24	Indicadores Clave (KPIs) Predictivos	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Desarrollo del mantenimiento industrial	9
Figura 2 Arquitectura IIOT en mantenimiento 4.0.....	20
Figura 3 Descripción de la computación en la nube.....	21
Figura 4 Diagrama para evaluar la madurez el Índice Global de Madurez	56
Figura 5 Diagnóstico de la madurez del SGM 4.0	66
Figura 6 Mapa de procesos del SGM 4.0.....	71
Figura 7 Arquitectura funcional del SGM 4.0 para la toma de decisiones.....	75
Figura 8 Línea de producción del radiofármaco I-131	97
Figura 9 Diagrama en 3D de una celda caliente	98
Figura 10 Diagramas de sistema HVAC en sala limpia	99

INTRODUCCIÓN

La llegada de la Industria 4.0 ha marcado un punto de inflexión significativo en el sector industrial. Caracterizada por la digitalización, la automatización y la toma de decisiones basada en datos, esta revolución promete una nueva era de eficiencia y productividad. La incorporación progresiva de tecnologías habilitadoras como el Internet Industrial de las Cosas, los sistemas ciberfísicos, las plataformas en la nube y la analítica avanzada ha permitido que las plantas industriales transiten hacia configuraciones altamente interconectadas, facilitando el despliegue de estrategias de mantenimiento predictivo y proactivo que reducen la incertidumbre y mejoran el desempeño de los activos (Ahmed Murtaza et al., 2024a).

Los principios fundamentales de la Industria 4.0 como la interoperabilidad, virtualización, descentralización, operación en tiempo real, orientación al servicio y modularidad, han transformado la lógica tradicional de las fábricas hacia arquitecturas distribuidas y colaborativas. En este nuevo esquema, los sistemas ciberfísicos actúan como el puente entre el entorno físico y las plataformas digitales, generando entornos de producción altamente flexibles y autónomos. Esta transición impulsa la evolución desde modelos jerárquicos rígidos hacia configuraciones más planas, donde máquinas, equipos y productos inteligentes interactúan entre sí conformando el concepto de fábrica inteligente (Arm et al., 2024).

En este escenario disruptivo, surge el enfoque de Mantenimiento 4.0, una evolución conceptual que integra tecnologías habilitadoras para anticipar fallas, optimizar intervenciones y garantizar el desempeño confiable de los activos. Este enfoque complementa y supera a las estrategias tradicionales mantenimiento como la correctiva y preventiva, mediante la incorporación de analítica predictiva, aprendizaje automático, Gemelos Digitales y toma de decisiones asistida por inteligencia artificial. Así, el mantenimiento deja de ser un proceso reactivo para convertirse en un sistema inteligente, capaz de analizar patrones, prever el deterioro y recomendar acciones óptimas (Işık & Zilka, 2025; Lee et al., 2015).

El Mantenimiento 4.0 no solo propone un cambio tecnológico, sino un nuevo paradigma de gestión. Este enfoque trasciende el mantenimiento preventivo o basado en condiciones, permitiendo anticiparse a fallas mediante algoritmos de pronóstico de vida útil (RUL), monitoreo en tiempo real a través del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), visualización

inmersiva con realidad aumentada, simulaciones con Gemelos Digitales y soporte en la nube para análisis avanzados (García & García, 2019).

En este marco, la presente tesis tiene como propósito desarrollar una propuesta metodológica de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 orientado a la toma de decisiones basadas en datos en plantas industriales. El enfoque metodológico se sustenta en referentes internacionales de gestión de activos, particularmente los lineamientos establecidos en la ISO 55001:2024 y su guía complementaria UNE-ISO 55002:2020, así como en desarrollos recientes vinculados al mantenimiento inteligente y a los modelos de decisión soportados en analítica avanzada. La metodología propuesta articula componentes clave del sistema de gestión, incluyendo el análisis del contexto organizacional, la definición de una arquitectura funcional, la estructuración de procesos estratégicos y operativos, y los criterios asociados al liderazgo, los recursos de soporte, la operación, la evaluación del desempeño y la mejora continua. En conjunto, estos elementos conforman un marco integral destinado a facilitar la transición hacia un mantenimiento digital, predictivo y orientado al valor.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción de la problemática

La gestión del mantenimiento constituye un eje crítico para garantizar la confiabilidad, seguridad y continuidad operativa de los activos industriales. Sin embargo, en muchos sectores productivos, los sistemas de mantenimiento siguen siendo predominantemente reactivos o preventivos, lo que limita su capacidad para anticipar fallas, optimizar recursos y reducir costos operativos. Esta situación se agrava en entornos donde la criticidad de los activos es elevada y la variabilidad de las condiciones de operación demanda mecanismos más avanzados de supervisión y decisión (Scaife, 2024). En consecuencia, las organizaciones enfrentan una brecha entre las necesidades reales de gestión del ciclo de vida de los activos y las capacidades que ofrecen sus modelos tradicionales de mantenimiento.

La llegada de la Industria 4.0 ha introducido un conjunto de tecnologías habilitadoras como sensores IIoT, big data analytics, computación en la nube, sistemas ciberfísicos, inteligencia artificial y Gemelos Digitales, que permiten transformar el mantenimiento hacia un enfoque predictivo y prescriptivo basado en datos (Işık & Zilka, 2025; Lee et

al., 2015). No obstante, la adopción efectiva de estas tecnologías no es homogénea en la industria. Muchas organizaciones carecen de criterios claros para priorizar las tecnologías más relevantes para sus procesos, lo que dificulta la selección estratégica de herramientas digitales y la optimización de la inversión tecnológica (Ahmed Murtaza et al., 2024a). Esta falta de priorización limita la capacidad del mantenimiento para evolucionar hacia modelos más inteligentes y alineados con los objetivos operativos.

Otro desafío estructural radica en la limitada madurez de los sistemas de mantenimiento existentes y constituye otra barrera para la transición hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0). En numerosas plantas industriales persisten deficiencias en la adquisición de datos, la trazabilidad de fallas y la evaluación del desempeño, lo que dificulta la integración de tecnologías digitales y la toma de decisiones basada en información confiable. La evidencia señala que la madurez organizacional y tecnológica es un factor determinante para el éxito de la transformación digital del mantenimiento, y que las brechas no identificadas pueden comprometer su implementación (Jasiulewicz-Kaczmarek & Antosz, 2023). Por ello, es necesario disponer de una metodología que permita evaluar objetivamente el nivel de madurez antes de avanzar hacia el Mantenimiento 4.0.

Asimismo, la ausencia de metodologías claras y estandarizadas para estructurar un SGM 4.0 genera incertidumbre en las organizaciones que buscan implementar prácticas alineadas a normas internacionales como ISO 55001:2024 y UNE-ISO 55002:2020. Estas normas establecen lineamientos generales de gestión de activos, pero no ofrecen una guía operativa detallada sobre cómo integrarlos con tecnologías emergentes ni cómo articular la gobernanza, los procesos y la infraestructura digital dentro de un sistema de mantenimiento avanzado (Hastings, 2021). En consecuencia, las empresas requieren un marco metodológico que permita estructurar adecuadamente los componentes estratégicos, operativos y tecnológicos que conforman un SGM 4.0.

Por último, incluso cuando existen iniciativas de digitalización la implementación de arquitecturas tecnológicas para monitorización de condición y mantenimiento predictivo continúa siendo limitada. La integración de sensores IIoT, plataformas cloud, algoritmos de inteligencia artificial y dashboards de supervisión requiere de una arquitectura coherente, escalable y adecuada al entorno operativo. Estudios recientes evidencian que, sin un diseño estructurado de la arquitectura digital, los datos no fluyen de manera efectiva, las predicciones pierden precisión y los procesos de mantenimiento no logran optimizarse (Nguyen et al., 2022).

En este escenario, resulta imprescindible desarrollar una propuesta metodológica integral que articule los elementos clave para la transición hacia un enfoque de mantenimiento predictivo y prescriptivo. Ello requiere, en primer lugar, priorizar el impacto de las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0; en segundo lugar, evaluar el nivel de madurez del sistema de mantenimiento para identificar brechas y capacidades existentes; en tercer lugar, estructurar un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 conforme a estándares internacionales como ISO 55001:2024; y, finalmente, diseñar una arquitectura de monitorización de condición y mantenimiento predictivo que habilite la toma de decisiones basadas en datos aplicado a un caso práctico. La integración de estas dimensiones permitirá a las organizaciones avanzar hacia un mantenimiento inteligente, más eficiente y alineado estratégicamente, capaz de generar valor sostenido en plantas industriales.

2. Formulación del problema

2.1 Problema general

¿Qué características y componentes debe integrar una propuesta metodológica de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 orientado a la toma de decisiones basadas en datos en plantas industriales?

2.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuál es el impacto relativo de las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 en la mejora del mantenimiento de activos físicos y a la reducción de costos en plantas industriales?
- b) ¿Cómo determinar el nivel de madurez del sistema de mantenimiento y las brechas existentes que condicionan la transición hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 en la organización?
- c) ¿Cómo estructurar e integrar, desde un enfoque metodológico, los componentes estratégicos, operativos y tecnológicos de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 alineado con la ISO 55001:2024 y orientado a la toma de decisiones basadas en datos en plantas industriales?

- d) ¿Cómo diseñar una arquitectura de monitorización de condición y mantenimiento predictivo que integre tecnologías 4.0 y permita evaluar en tiempo real sistemas críticos en una planta industrial?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta metodológica de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 orientado a la toma de decisiones basadas en datos en plantas industriales.

3.2 Objetivos específicos

- a) Determinar el impacto relativo de las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 en el mantenimiento de activos físicos y a la reducción de costos en plantas industriales
- b) Definir una metodología para evaluar el nivel de madurez del sistema de mantenimiento e identificar las brechas que condicionan la transición hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, mediante el Índice Global de Madurez y un diagnóstico multidimensional.
- c) Diseñar una propuesta metodológica que estructure e integre los componentes estratégicos, operativos y tecnológicos de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, alineado con la ISO 55001:2024 y orientado a la toma de decisiones basadas en datos en plantas industriales.
- d) Desarrollar una arquitectura funcional para la monitorización de condición y mantenimiento predictivo alineada con los principios del mantenimiento 4.0 aplicable a un caso práctico industrial.

4. Hipótesis

4.1 Hipótesis general

La integración coherente de componentes estratégicos, operativos y tecnológicos en una propuesta metodológica de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 constituye

un marco adecuado para orientar la toma de decisiones basadas en datos y fortalecer la gestión de activos físicos en plantas industriales.

4.2 Hipótesis específico

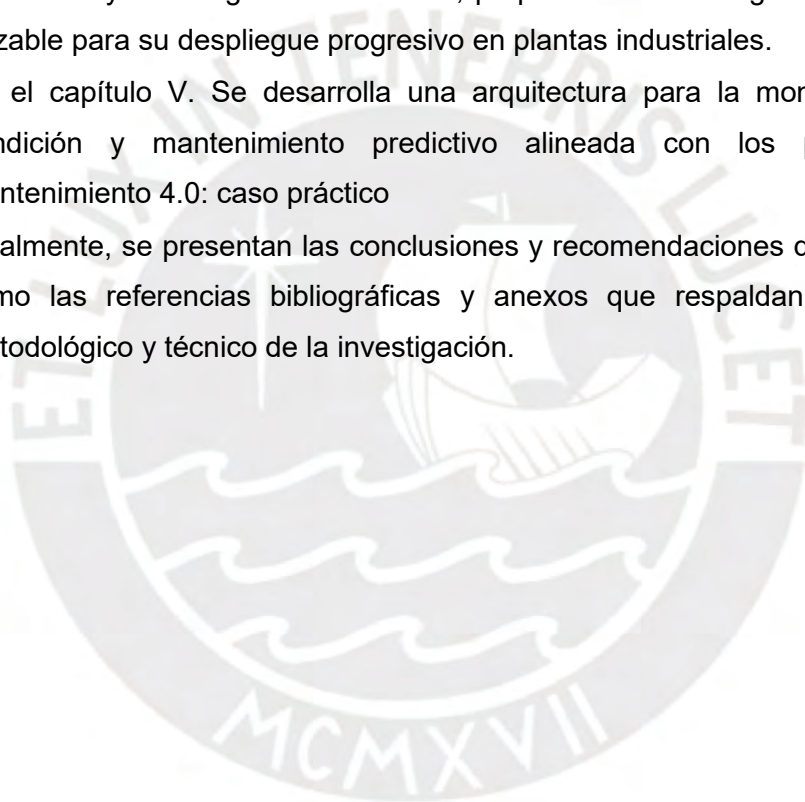
- a) Las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 generan impactos diferenciados en la mejora del mantenimiento de activos físicos y en la reducción de costos operativos, pudiendo establecerse su prioridad relativa mediante el método AHP.
- b) La evaluación del sistema de mantenimiento mediante el Índice Global de Madurez y un diagnóstico multidimensional permite identificar brechas críticas que condicionan la transición hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0.
- c) La estructuración e integración de componentes estratégicos, operativos y tecnológicos en una propuesta metodológica alineada a la ISO 55001:2024 permite implementar de manera efectiva un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 orientado a la toma de decisiones basadas en datos.
- d) El diseño e implementación de una arquitectura funcional de monitorización de condición y mantenimiento predictivo basada en tecnologías 4.0 integra sensores IIoT, gateways industriales, computación en la nube, algoritmos de Machine Learning y dashboards inteligentes aplicados a sistemas críticos de la producción de radiofármacos

5. Estructura del documento

La presente investigación se organiza en cinco capítulos principales, complementados por conclusiones, recomendaciones, referencias y anexos, los cuales se describen a continuación:

- Capítulo I. Marco teórico y conceptual: presenta los fundamentos del mantenimiento en el contexto de la Industria 4.0 y las tecnologías habilitadoras que sustentan el enfoque de Mantenimiento 4.0.
- En el capítulo II. Impacto de las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 en el mantenimiento de activos físicos: analiza comparativamente el impacto relativo de las tecnologías 4.0 mediante el método AHP, identificando su contribución a la optimización del costo del mantenimiento industrial.

- En el capítulo III. Metodología de diagnóstico y madurez para la transición hacia el Mantenimiento 4.0: desarrolla el Índice Global de Madurez (IGM) y un diagnóstico multidimensional basado en estándares internacionales para identificar brechas y capacidades requeridas para avanzar hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0.
- En el Capítulo IV, Propuesta metodológica de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 orientado a la toma de decisiones basadas en datos, se desarrolla un marco metodológico integral alineado con la norma ISO 55001:2024, que estructura de manera coherente los componentes estratégicos, operativos y tecnológicos del sistema, proporcionando una guía prescriptiva y trazable para su despliegue progresivo en plantas industriales.
- En el capítulo V. Se desarrolla una arquitectura para la monitorización de condición y mantenimiento predictivo alineada con los principios del mantenimiento 4.0: caso práctico
- Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio, así como las referencias bibliográficas y anexos que respaldan el desarrollo metodológico y técnico de la investigación.



CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL: MANTENIMIENTO EN EL CONTEXTO DE LA INDUSTRIA 4.0

1.1 Mantenimiento industrial: evolución y estrategias de mantenimiento

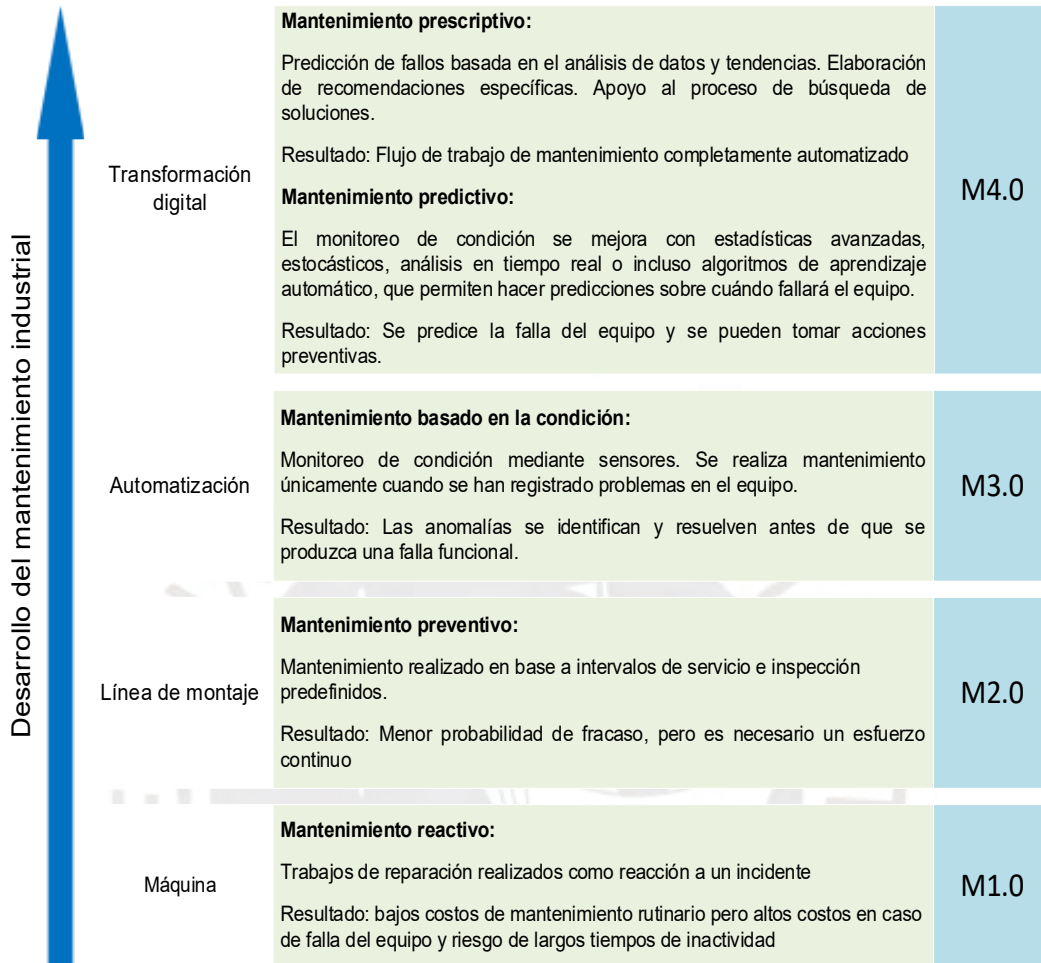
De acuerdo con la norma UNE-EN 13306 (AENOR, 2018), el mantenimiento se entiende como el conjunto de acciones técnicas, administrativas y de gestión a lo largo del ciclo de vida de un activo, con el fin de conservar o restaurar su funcionalidad. El concepto de mantenimiento de activos abarca todas las acciones destinadas a supervisar, restaurar o mejorar la funcionalidad de un activo, o a evitar que pierda total o parcialmente su funcionalidad (Pincioli et al., 2023). Estudios existentes han presentado interpretaciones divergentes del término “mantenimiento” y su propósito. La función principal del mantenimiento es reducir el impacto de las averías y ampliar la accesibilidad a un menor coste y, en última instancia, mejorar rendimiento (Sahli et al., 2021).

La evolución del mantenimiento industrial ha sido impulsada por el avance tecnológico y el aumento de la complejidad de los equipos, lo que demandó enfoques cada vez más sofisticados para garantizar su fiabilidad y disponibilidad. Este proceso transformó la gestión del mantenimiento desde modelos reactivos hacia estrategias proactivas y finalmente hacia esquemas basados en datos. Así, la disciplina avanzó desde el mantenimiento reactivo (1.0) al preventivo (2.0), al basado en condición (3.0) y, más recientemente, al Mantenimiento 4.0, sustentado en capacidades predictivas y prescriptivas habilitadas por tecnologías digitales (Jasiulewicz-Kaczmarek & Antosz, 2023), como se observa en la figura 1.

Una estrategia de mantenimiento puede definirse como el conjunto de directrices que regulan la planificación y ejecución de las actividades de mantenimiento sobre un activo. Estas directrices abarcan la selección del tipo de intervención, la determinación de las frecuencias de mantenimiento, la priorización de componentes o subsistemas, la gestión de repuestos y la organización del equipo técnico encargado de su ejecución (Pincioli et al., 2023). En las siguientes secciones se describen las principales estrategias empleadas en el ámbito industrial.

Figura 1

Desarrollo del mantenimiento industrial



Nota. Adaptado de (Jasiulewicz-Kaczmarek & Antosz, 2023)

- a) **Mantenimiento reactivo (correctivo):** consiste en intervenir únicamente cuando se produce una falla en el activo. Esta estrategia incluye acciones de carácter emergencial provocadas por averías imprevistas y, en consecuencia, no contempla una planificación previa. Debido a su naturaleza disruptiva, resulta adecuada únicamente para activos cuya criticidad es baja y cuyo impacto en la operación o el negocio es limitado. De lo contrario, su uso incrementa significativamente los costos, ya que la intervención suele centrarse en la reparación o sustitución del componente dañado (Errandonea et al., 2020).

La filosofía de reparar cuando falla genera pérdidas de capacidad no previstas y depende fuertemente de la disponibilidad inmediata del personal técnico. Asimismo, las fallas pueden ocasionar daños severos en los equipos, llegando en algunos casos

a requerir el reemplazo total del activo, lo que incrementa los costos y depende de la disponibilidad de repuestos. En la práctica actual, esta estrategia se aplica principalmente a activos de bajo costo, pequeña escala, fácil reemplazo y para los cuales es viable mantener repuestos en inventario (Zheng et al., n.d.).

- b) Mantenimiento preventivo:** consiste en ejecutar intervenciones programadas en intervalos definidos con el propósito de evitar fallas y reducir la dependencia de acciones correctivas no planificadas. Se trata de un enfoque proactivo que busca preservar la funcionalidad del activo mediante actividades realizadas antes de que se produzca una avería. Su planificación se apoya en la experiencia del responsable de mantenimiento, quien establece diferentes frecuencias de intervención para minimizar interrupciones del servicio o, cuando estas son inevitables, reducir su impacto mediante una programación anticipada (Errandonea et al., 2020).

No obstante, esta estrategia presenta un dilema para los tomadores de decisiones: incrementar los costos mediante reemplazos o intervenciones más frecuentes para asegurar un alto margen de seguridad, o asumir el riesgo de que el equipo falle antes del final de su vida útil estimada, generando pérdidas de capacidad similares a las del mantenimiento reactivo (Zheng et al., n.d.).

- c) Mantenimiento Basado en la Condición (CBM):** consiste en utilizar información del estado real del equipo para determinar las intervenciones de mantenimiento más adecuadas. Su finalidad es prevenir fallas funcionales o deterioros significativos del rendimiento mediante la detección temprana de desviaciones respecto a las condiciones normales de operación. Para ello, el CBM emplea técnicas de monitoreo, diagnóstico y pronóstico que permiten identificar fallas incipientes y estimar el comportamiento futuro del activo, a partir de datos recopilados y analizados de manera sistemática (Teixeira et al., 2020).

Los avances en Big Data, IoT y plataformas en la nube han potenciado esta estrategia, posibilitando decisiones en tiempo real basadas en grandes volúmenes de datos provenientes de múltiples fuentes. Además, la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial permite mejorar el diagnóstico y obtener información más detallada del estado de los activos, consolidando así el CBM, también conocido como mantenimiento basado en diagnóstico, como un pilar fundamental para la transición hacia modelos de mantenimiento digitales (Errandonea et al., 2020).

- d) Mantenimiento predictivo:** constituye una evolución del mantenimiento preventivo y del mantenimiento basado en la condición, orientada a anticipar fallas mediante el

análisis de datos operativos. Su propósito es estimar el momento más probable de ocurrencia de una avería, permitiendo programar intervenciones con mayor precisión y reducir la incertidumbre operativa. A diferencia del mantenimiento preventivo, que se ejecuta en intervalos fijos definidos según la experiencia del personal de mantenimiento, el enfoque predictivo utiliza información real del estado del activo para optimizar la toma de decisiones y minimizar interrupciones no planificadas (Errandonea et al., 2020). Este enfoque requiere sistemas avanzados de monitoreo y herramientas de pronóstico capaces de procesar datos sujetos a condiciones variables y fuentes múltiples de incertidumbre propias del entorno operativo industrial. Estas variaciones influyen significativamente en los mecanismos de degradación y en la dinámica de falla, razón por la cual el tratamiento estadístico y analítico de los datos se vuelve esencial para garantizar la fiabilidad de los pronósticos (Pincioli et al., 2023).

El mantenimiento predictivo puede implementarse mediante dos enfoques complementarios. El enfoque basado en datos utiliza grandes volúmenes de información capturada por sensores y procesada mediante algoritmos de análisis, que permiten identificar patrones y tendencias de degradación del activo. En contraste, el enfoque basado en modelos se fundamenta en representaciones matemáticas, físicas o numéricas del comportamiento del componente, capaces de describir con alta precisión su evolución y degradación (Errandonea et al., 2020). Ambos enfoques fortalecen la capacidad de la organización para anticipar fallas, optimizar recursos y avanzar hacia un modelo de mantenimiento 4.0 plenamente digitalizado y predictivo.

- e) **Mantenimiento prescriptivo:** constituye el nivel más avanzado dentro del mantenimiento inteligente, al integrar predicción y optimización en un mismo proceso de decisión. A diferencia del mantenimiento predictivo, que solo estima el momento probable de falla, el enfoque prescriptivo recomienda acciones óptimas sobre cuándo, cómo y con qué recursos intervenir, combinando análisis de datos históricos y en tiempo real con técnicas de inteligencia artificial, simulación y Gemelos Digitales (Errandonea et al., 2020).

Este enfoque no solo anticipa fallas, sino que evalúa múltiples escenarios hipotéticos mediante modelos operativos y de mantenimiento, permitiendo determinar la estrategia más eficaz antes de ejecutar una intervención. A partir de los datos sensorizados del activo, el sistema genera recomendaciones que consideran el

impacto de cada posible acción en términos de confiabilidad, costo, disponibilidad y seguridad del sistema, reduciendo así la incertidumbre en la toma de decisiones (Pincioli et al., 2023).

En síntesis, el mantenimiento prescriptivo representa la cima de la evolución hacia el mantenimiento 4.0, al habilitar intervenciones autónomas, optimizadas y orientadas al máximo valor operativo mediante el uso profundo de analítica avanzada y modelos digitales de alto desempeño.

1.2 Industria 4.0 y su impacto en la gestión de activos físicos

En el contexto manufacturero, los activos físicos comprenden el conjunto de equipos, sensores, actuadores y demás elementos que intervienen en los procesos de producción (Seif et al., 2019). La tendencia actual apunta hacia sistemas inteligentes de gestión de activos, los cuales integran digitalización, gestión del conocimiento y herramientas de inteligencia artificial para optimizar el ciclo de vida de los activos y apoyar decisiones fundamentadas en datos (Candón et al., 2019).

La Industria 4.0 ha transformado profundamente las operaciones industriales, promoviendo mayor flexibilidad, personalización de productos, eficiencia y estándares superiores de calidad. En este escenario, el mantenimiento se convierte en un elemento estratégico, pues la producción digitalizada de una fábrica inteligente demanda capacidades analíticas avanzadas y una gestión integral del flujo de datos en tiempo real. La literatura describe esta evolución mediante conceptos como mantenimiento digital, inteligente o Mantenimiento 4.0, todos orientados a la integración de tecnologías emergentes en la función de mantenimiento (Silvestri et al., 2020a).

La cuarta revolución industrial impulsa modelos de automantenimiento y estrategias orientadas a minimizar o eliminar los tiempos de inactividad mediante sistemas autónomos de diagnóstico y reparación. Este avance es posible gracias a la convergencia de tecnologías como IoT, big data, computación en la nube, realidad aumentada, fabricación aditiva y mecanismos de ciberseguridad. Su incorporación en la gestión de activos permite monitorear el uso de equipos, identificar patrones operativos y anticipar fallas, fortaleciendo la toma de decisiones y elevando la confiabilidad operativa (Essalih et al., 2025a).

El uso de análisis masivo de datos, simulación y algoritmos de decisión potencia la inteligencia de la fábrica moderna, generando recomendaciones óptimas que desplazan

los enfoques tradicionales hacia esquemas prescriptivos de mantenimiento (Silvestri et al., 2020a). Los avances en sensores, junto con el desarrollo de métodos de inteligencia artificial y aprendizaje automático, permiten estimar el estado actual y futuro de los componentes, abriendo la puerta a estrategias de mantenimiento prescriptivo que integran operación y mantenimiento como procesos interdependientes dentro de un mismo horizonte de optimización (Pincioli et al., 2023).

1.3 Internet Industrial de las Cosas (IIoT) aplicado a mantenimiento 4.0

El Internet Industrial de las Cosas (IIoT) constituye una de las tecnologías principales de la Industria 4.0, al trasladar los principios del Internet de las cosas al entorno productivo. Su función esencial es habilitar la comunicación autónoma entre máquinas y equipos, permitiendo que los activos físicos se conecten mediante sensores y dispositivos que operan con protocolos estandarizados de red. Esta infraestructura digital facilita la captura continua de datos operativos y crea las bases para el mantenimiento inteligente y la automatización avanzada en la planta industrial (Silvestri et al., 2020b).

1.3.1 Hardware

- a) **Sensores y actuadores:** detectan y transmiten datos como temperatura, presión, humedad, vibración, etc.
- b) **Controladores Lógicos Programables (PLCs):** para el control y automatización de procesos industriales y se integran con sensores, actuadores y sistemas SCADA.
- c) **Gateways:** conectan dispositivos locales o campo con la nube o sistemas centrales. En la Tabla 1 se presentan las características de algunos gateways IIoT industriales.

1.3.2 Software

- a) **Sistemas de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (CMMS):** el Computerized Maintenance Management System (CMMS) se refiere a un sistema digital diseñado para planificar, controlar, ejecutar y optimizar las actividades de mantenimiento de activos físicos en una organización (máquinas, equipos, instalaciones, etc.). Permiten generar gestión de órdenes de trabajo (OTs), planificación de mantenimiento, gestión de activos, control de repuestos e inventarios, indicadores clave (KPIs), conectividad con IIoT o sensores, reportes y

análisis. En la Tabla 2 se presentan las características de algunos sistemas CMMS utilizados en mantenimiento.

Tabla 1

Características de gateways IloT industriales

Gateway IloT	Procesador	Conectividad	Protocolos	Aplicaciones	Ventajas
Siemens SIMATIC IOT2050	ARM Cortex-A8 / Debian Linux	Ethernet, RS232/485, USB	Modbus, MQTT, OPC UA	Automatización general, integración MindSphere	Integración con ecosistema Siemens
Advantech UNO-2271G	Intel Atom E3815 / Yocto Linux	LAN, USB, RS-232/422/485, Wi-Fi, 4G	MQTT, Modbus, RESTful API	Edge Computing, monitorización de datos	Diseño fanless, compacto, flexible
HPE Edgeline EL1000	Intel Xeon / EdgeLine OS	OPC UA, MQTT, Modbus TCP, Ethernet	MQTT, OPC UA, Modbus TCP	Análisis predictivo, mantenimiento	Potente edge computing
Dell Edge Gateway 3000	Intel Atom / Ubuntu Core o Windows	LTE, Wi-Fi, Ethernet, BLE	MQTT, AMQP, HTTPS	HVAC, energía, automatización liviana	Diseñado para ambientes industriales hostiles
Ewon Flexy 205	ARM9 / eFive Linux	Ethernet, Wi-Fi, 4G (opcional), RS232, RS485	Modbus, OPC UA, MQTT, SNMP, FTP, HTTPS	Mantenimiento predictivo, acceso remoto seguro	Modular, seguro, ideal para mantenimiento remoto

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

Tabla 2

Características de softwares CMMS utilizadas en mantenimiento

Funcionalidad	IBM Maximo	SAP PM	Infor EAM	Fiix by Rockwell	MaintainX	EasyMaint
Gestión de Órdenes de Trabajo (OTs) Planificación	Completa	Completa	Completa	Intuitiva	Ágil	Completa
	Avanzada	Integrada	Detallada	Automatizada	Visual	Programada
Gestión de Activos	Multisitio	Integrada	Avanzada	Intuitiva	Básica	Intuitiva
Control de Repuestos e Inventarios Indicadores Clave (KPIs)	Profunda	SAP MM	Integrada	Centralizada	Media	Inventario Integrado
	Configurable	Integrado	vanzado	Dashboard KPI	Personalizable	KPIs Visuales
Conectividad con IloT / Sensores Reportes y Análisis	Watson IoT	OPC UA	IoT Ready	API + IloT bridge	Básico	Básico
	Avanzado	SAP BI	Dashboards	Visuales	Exportable	Reportes Visuales
Facilidad de Uso	Complejo	Técnico	Técnico	Intuitivo	Muy fácil	Intuitivo
Tipo de Implementación	Local / Cloud	Local	Local / Cloud	Cloud	Cloud	Local / Cloud

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

b) Sistemas de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA): Monitorean y controlan procesos industriales en tiempo real. Este cuadro presenta una comparación entre distintos sistemas SCADA utilizados en la industria para la monitorización y control en tiempo real de procesos. En la Tabla 3 se presentan las características de algunos sistemas SCADA utilizados en la industria.

Tabla 3

Características de softwares SCADA utilizadas en la industria

Sistema SCADA	Proveedor	Integración con IIoT	Capacidades de Supervisión	Aplicaciones	Ventajas
Siemens WinCC	Siemens	Alta (OPC UA, Profinet, MindSphere)	Visualización avanzada, control de procesos, alarmas	Diagnóstico en tiempo real, conexión con sensores Siemens, integración con CMMS	Alto rendimiento gráfico, integración directa con equipos Siemens
Wonderware (AVEVA System Platform)	AVEVA (Schneider Electric)	Alta (MQTT, OPC, REST APIs, Edge)	SCADA distribuido, IoT, virtualización, análisis de tendencias	Supervisión remota, analítica predictiva, mantenimiento basado en condiciones	Plataforma abierta y escalable, ideal para plantas complejas
Ignition SCADA	Inductive Automation	Alta (Tag Historian, MQTT, OPC UA)	Plataforma web, HMI SCADA, scripting avanzado	Conexión con plataformas de análisis e historiales para mantenimiento predictivo	Licencia ilimitada, web-based, integración con SQL y Python
iFIX	GE Digital	Media-Alta (OPC, Historian, Edge)	Supervisión de procesos, interfaz intuitiva, alarmas y tendencias	Monitoreo de condiciones, alertas inteligentes para mantenimiento	Integración con Predix, alta confiabilidad y facilidad de uso
Movicon.NExT	Progea / Emerson	Alta (OPC UA, MQTT, IIoT-ready)	Interfaz moderna, gráficos vectoriales, dashboards	Mantenimiento predictivo, analítica basada en datos	Modular, fácil de escalar, compatible con entornos industriales

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

c) Plataformas de adquisición y análisis de datos: estas plataformas permiten adquirir, analizar y visualizar datos provenientes de sensores, dispositivos Edge y sistemas industriales para la toma de decisiones basada en datos. En las Tablas 4 y 5 se presentan las características de algunas plataformas de IIoT y de análisis y visualización de datos utilizadas en la industria, respectivamente.

Tabla 4*Características plataformas IIOT para adquisición de datos*

Plataforma	Proveedor	Función Principal	Entrada de Datos	Salida de Datos	Ventajas Clave
AWS IoT Core	Amazon Web Services	Gestión de dispositivos y datos IIoT	Sensores, MQTT, Edge Gateways	AWS Cloud, SiteWise	Escalabilidad, integración con servicios AWS
Azure IoT Hub	Microsoft	Gestión de dispositivos y eventos IoT	Dispositivos IoT, SDKs, Edge	Azure Event Hub, Stream Analytics	Seguridad empresarial, integración con Azure
PTC ThingWorx	PTC	Plataforma de desarrollo IIoT industrial	Keeware, OPC UA, sensores	Dashboards, RA, Digital Twin	Alta personalización, enfoque manufactura
MindSphere	Siemens	Monitoreo y análisis de activos industriales	PLC, SCADA, IIoT Siemens	Aplicaciones MindApps	Especialización en equipos Siemens

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

Tabla 5*Características plataformas de análisis y visualización de datos*

Plataforma	Proveedor	Función Principal	Tipo de Datos	Capacidades Analíticas	Ventajas Clave
Power BI	Microsoft	Visualización y análisis de datos industriales	Tablas, KPIs, históricos	Dashboards, DAX, filtros dinámicos	Fácil de usar, integración con Excel y Azure
Azure TSI	Microsoft	Análisis de series temporales IoT	Sensores, series en tiempo real	Exploración, búsqueda de patrones	Ideal para mantenimiento predictivo
Grafana	Grafana Labs	Visualización de métricas y series de tiempo	Series, KPIs, sensores	Dashboards personalizables	Open source, flexible, plugins disponibles
Tableau	Salesforce	Análisis visual de datos empresariales	Datos estructurados y APIs	Storytelling visual, paneles avanzados	Alta estética visual, fuerte en BI ejecutivo

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.3.3 Protocolos de comunicación

Los protocolos de comunicación son conjuntos de reglas y estándares que permiten que dos o más dispositivos intercambien información de forma estructurada, segura y eficiente dentro de una red. Los principales son los siguientes:

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): Protocolo ligero ideal para comunicaciones máquina a máquina en entornos con ancho de banda limitado.

- OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture): Protocolo independiente de la plataforma que permite la interoperabilidad entre dispositivos y sistemas.
- Modbus y Profinet: Protocolos ampliamente utilizados en la automatización industrial para la comunicación entre dispositivos electrónicos.

En la Tabla 6 se presentan las características de algunos protocolos de comunicación utilizados en la industria.

Tabla 6

Características de los principales protocolos de comunicación industrial

Protocolo	Tipo de Comunicación	Soporte IIoT	Topología	Ventajas Técnicas	Limitaciones	Aplicaciones Típicas
MQTT	Publicación / Suscripción	Alta	Estrella, nube	Ligero, ideal para redes de bajo ancho de banda, orientado a eventos	Depende de broker externo, no determinista	Sensores IIoT, mantenimiento remoto, monitoreo en tiempo real
OPC UA	Cliente / Servidor y Pub/Sub	Muy Alta	Cliente-servidor, nube	Interoperabilidad, seguridad, cifrado, modelado de datos	Complejo de implementar, mayor uso de recursos	Automatización industrial, SCADA, mantenimiento predictivo
HTTPS	Cliente / Servidor (Web Segura)	Media	Cliente-servidor	Cifrado TLS, ampliamente adoptado, integrable con API REST	Mayor latencia que protocolos especializados	Comunicación segura con plataformas en la nube, dashboards
FTP	Cliente / Servidor (Transferencia de Archivos)	Baja	Cliente-servidor	Estándar para envío/recepción de archivos	No seguro sin cifrado adicional, obsoleto para transmisión crítica	Transferencia de reportes de mantenimiento, historiales de sensores
SMTP	Cliente / Servidor (Correo electrónico)	Media	Servidor de correo	Permite notificaciones por correo, integración sencilla	No tiempo real, limitado a comunicación unidireccional	Alertas de mantenimiento, notificación de fallos a técnicos
Modbus (RTU/TCP)	Maestro / Esclavo	Media	Bus, punto a punto, estrella	Simple, ampliamente usado, fácil de implementar	Sin cifrado nativo, sin autenticación, no apto para grandes volúmenes de datos	Instrumentación industrial, integración de sensores, dispositivos legacy
Profinet	Cliente / Servidor	Alta	Estrella, en red Ethernet	Tiempo real, sincronización precisa, integración con PLCs Siemens	Mayor complejidad de configuración, más costoso	Automatización industrial, control de procesos, redes de sensores y actuadores
EtherNet/IP	Productor / Consumidor	Alta	Estrella, red industrial Ethernet	Basado en objetos, compatible con Rockwell, tiempo real moderado	Ancho de banda medio-alto, requiere infraestructura Ethernet industrial	Automatización, redes industriales, integración con PLCs Allen-Bradley

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.3.4 Redes de comunicación aplicadas a IIOT

Las redes de comunicación utilizados garantizan el flujo seguro y eficiente de datos en tiempo real entre sensores, actuadores, controladores, plataformas en la nube y usuarios final. En la Tabla 7 se presentan las características de algunas redes de comunicación utilizadas en la industria, que incluyen tanto redes inalámbricas como cableadas, con énfasis en su aplicabilidad para la conectividad, la transmisión de datos, la escalabilidad y la eficiencia energética en entornos industriales.

Tabla 7

Características de las principales redes comunicación industrial

Tecnología de Red	Tipo de Medio	Alcance Aproximado		Requiere Hardware Especializado	Función Principal en IIoT
Ethernet Industrial	Cableado	100 m - km (con switches)	10 Mbps - 1 Gbps	Sí (switches, NICs industriales)	Conectividad robusta en planta
Wi-Fi (WLAN)	Inalámbrico	30-100 m	Hasta 1 Gbps	Sí (antenas industriales)	Movilidad y flexibilidad
LoRaWAN	Inalámbrico	>10 km	0.3 - 50 kbps	Sí (gateways LoRa)	Cobertura amplia en exteriores
NB-IoT	Inalámbrico	>10 km	Hasta 100 kbps	Sí (módems NB-IoT)	Conectividad IoT en redes celulares
5G	Inalámbrico	>1 km (urbano)	Hasta 10 Gbps	Sí (antenas 5G)	Alta velocidad y baja latencia
ZigBee	Inalámbrico	10-100 m	20 - 250 kbps	Sí (coordinadores ZigBee)	Malla inalámbrica local
Bluetooth Low Energy (BLE)	Inalámbrico	10-50 m	125 kbps	Sí (BLE modules)	Conectividad de bajo consumo

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.3.5 Ciberseguridad

Prácticas para proteger los activos físicos, digitales y de comunicación industrial frente a ciberamenazas. La ciberseguridad en entornos IIoT requiere garantizar, ante todo, la disponibilidad, integridad y continuidad operativa de los procesos industriales.

- Defensa en profundidad: múltiples capas de seguridad desde el sensor hasta la nube.

- Zero Trust Architecture: nunca confiar, siempre verificar. Ni siquiera dentro de la red interna.
- Segmentación de red: separar redes IT (informática) y OT (operación) mediante firewalls y zonas DMZ.
- Gestión de identidades y accesos: control granular basado en roles (RBAC) y autenticación multifactor.
- Monitoreo y respuesta activa: sistemas de detección de intrusos (IDS/IPS) adaptados al entorno industria

En la Tabla 8 se presenta la ciberseguridad aplicada al Internet Industrial de las Cosas (IIoT), detallando los principales riesgos y las medidas de seguridad recomendadas para cada capa de una arquitectura IIoT.

Tabla 8

Ciberseguridad aplicada al IIoT

Capa IIoT	Vulnerabilidades Comunes	Controles de Seguridad Recomendados
Capa Física	Manipulación de sensores, sabotaje físico	Enclosures protegidos, etiquetas de seguridad, control físico de acceso
Capa de Control (PLC, RTU)	Modificación de lógica, firmware alterado	Autenticación, arranque seguro, control de cambios, listas blancas
Capa de Comunicación	Sniffing, MITM, suplantación de dispositivos	TLS/SSL, VPN industrial, firewalls, uso de protocolos seguros (MQTTs, OPC-UA)
Capa Edge	Malware, acceso no autorizado	Control de puertos USB, whitelisting de procesos, autenticación fuerte
Capa de Supervisión (SCADA)	Accesos indebidos, ransomware	RBAC, autenticación multifactor, aislamiento de red
Capa de Plataforma / Nube	Fugas de datos, ataques a APIs, cuentas comprometidas	Cifrado de datos, gestión de identidades, auditorías automáticas

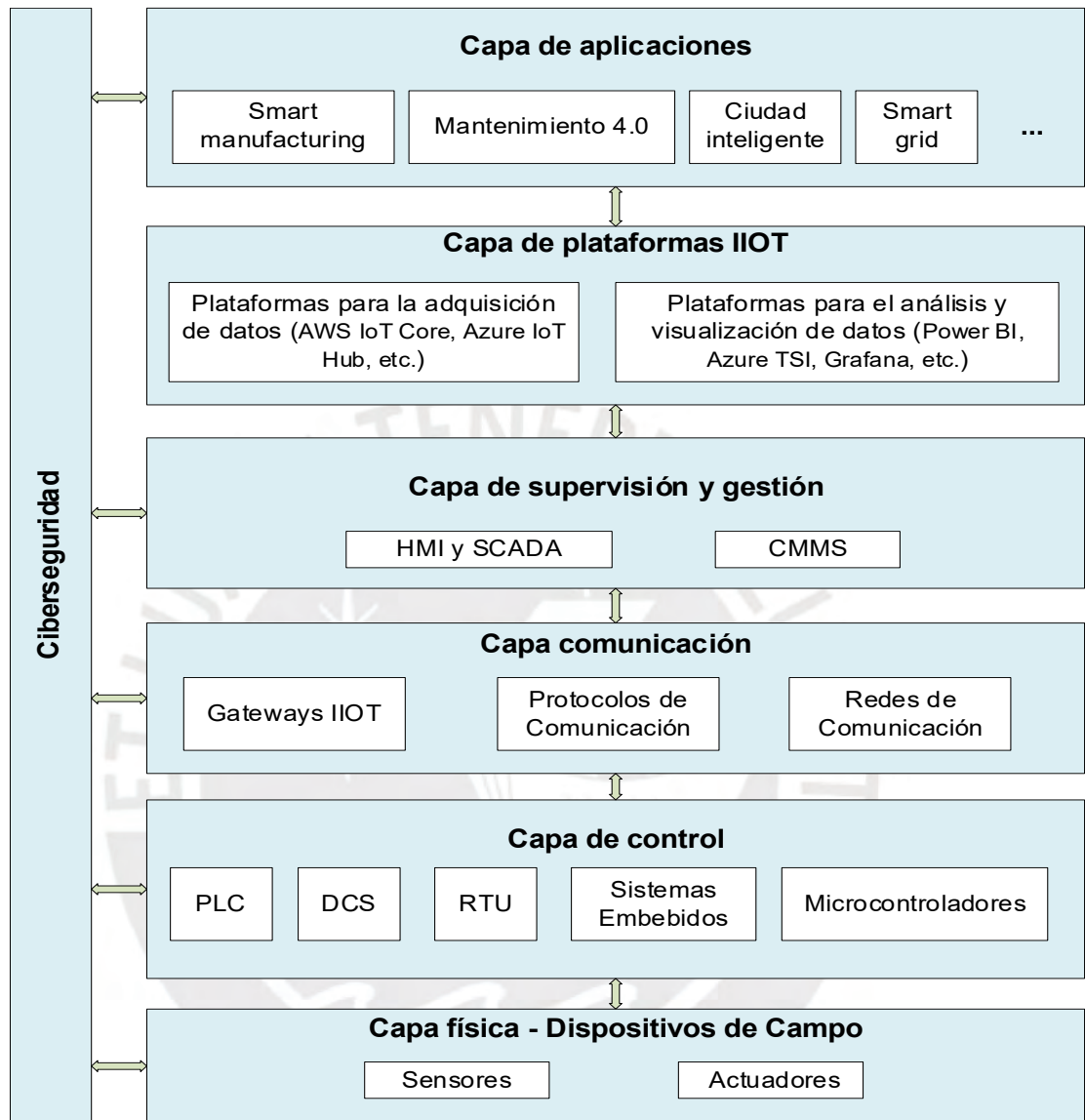
Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.3.6 Arquitectura IIOT en mantenimiento 4.0

La arquitectura del IIoT se compone de múltiples capas interrelacionadas que permiten la conexión, adquisición, procesamiento, análisis y gestión de datos provenientes del entorno físico industrial. Esta estructura integra hardware, software, redes y protocolos, distribuidos de manera jerárquica para garantizar una operación eficiente, segura y en tiempo real, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Arquitectura IIOT en mantenimiento 4.0



Nota. Elaboración propia adaptado de (Dominguez-Bolaño et al., 2022)

1.4 Computación en la nube en mantenimiento 4.0

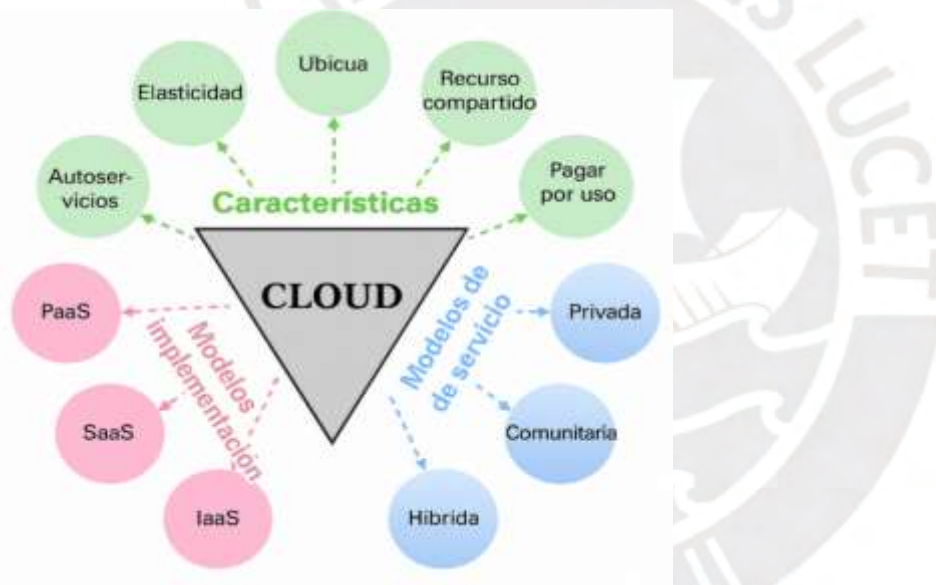
La computación en la nube constituye un enfoque moderno de procesamiento y almacenamiento digital que permite disponer de recursos informáticos virtualizados con capacidad de escalarse dinámicamente, mediante acceso remoto vía Internet. Esta tecnología facilita la transferencia directa de datos provenientes de dispositivos IIoT hacia plataformas en la nube para su estructuración, análisis y conservación,

proporcionando entornos de operación flexibles, adaptables y con alta disponibilidad (Doshi & Varghese, 2021).

En términos operativos, la nube se concibe como un modelo orientado al acceso bajo demanda a un conjunto compartido de servicios tecnológicos configurables, tales como servidores, redes, almacenamiento y aplicaciones, los cuales pueden habilitarse o liberarse con mínima intervención administrativa. Este paradigma integra cinco atributos esenciales: autoservicio, accesibilidad amplia, agrupamiento eficiente de recursos, elasticidad y medición del consumo, así como tres modalidades de provisión de servicios (SaaS, PaaS e IaaS) y cuatro esquemas de despliegue (nube pública, privada, comunitaria e híbrida), tal como se describe en la Figura 3.

Figura 3

Descripción de la computación en la nube.



Nota. Adaptado de (Bello et al., 2021)

La computación en la nube y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) actúan como tecnologías complementarias dentro del Mantenimiento 4.0. Mientras el IIoT posibilita la captura continua y la transmisión de datos operativos directamente desde los activos físicos, la nube proporciona la infraestructura remota necesaria para almacenar, procesar y analizar dicha información. Esta combinación permite transformar grandes volúmenes de datos en conocimiento accionable, apoyando la toma de decisiones inteligentes orientadas a la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.

La Tabla 9 resume el aporte diferencial que ofrece la computación en la nube frente al IIoT en el entorno industrial, destacando sus funciones específicas, las herramientas

tecnológicas que las soportan y los beneficios que generan en términos de escalabilidad, analítica avanzada y optimización del mantenimiento.

Tabla 9

Valor agregado de la computación en la nube respecto al IIOT

Dimensión	IIoT (Rol base)	Valor agregado de la computación en la nube
Adquisición de datos	Sensores, actuadores y PLCs recolectan datos físicos	Permite centralizar, almacenar y sincronizar grandes volúmenes de datos desde múltiples fuentes y ubicaciones
Capacidad de procesamiento	Procesamiento local (Edge o Gateway), limitado por capacidad de hardware	Ofrece capacidad de cómputo escalable para análisis avanzados (ML, IA, simulaciones) sin límite físico
Visualización y Análisis	Lectura en tiempo real	Dashboards inteligentes y análisis multidimensional
Automatización de decisiones	Puede activar eventos simples vía lógica programada en PLCs	Permite decisiones inteligentes basadas en algoritmos predictivos, KPIs y modelos de optimización integrados con sistemas CMMS
Mantenimiento predictivo	Detecta condiciones anómalas	Predice fallas, estima ciclos de vida y genera alertas estratégicas basadas en modelos entrenados
Interconectividad	Conectado a nivel planta, requiere gateways para escalar	Interoperabilidad global con plataformas ERP, CMMS, CRM, BI mediante APIs y servicios en la nube
Reducción de Costos	Reduce costos operativos al digitalizar la recolección de datos	Reduce inversión en infraestructura física (CAPEX) y mejora la eficiencia operativa (OPEX) mediante SaaS y PaaS

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.5 Big Data Analytics en mantenimiento 4.0

El crecimiento del IoT ha impulsado la generación masiva de datos industriales, caracterizados por gran volumen, diversidad de formatos y alta velocidad de transmisión. Esta naturaleza heterogénea y dinámica dificulta su aprovechamiento pleno en entornos productivos; por ello, el Big Data Analytics (BDA) se ha consolidado como un componente crítico de la manufactura inteligente. Su aplicación se fundamenta en dos enfoques principales: el análisis guiado por modelos y el análisis orientado por datos, ambos dirigidos a extraer patrones de comportamiento y conocimiento operativo útil (Wang et al., 2022).

En paralelo, el avance de la inteligencia artificial, el aprendizaje automático, la minería y fusión de datos ha fortalecido el análisis de grandes repositorios de información industrial. Estas herramientas permiten procesar datos históricos y en tiempo real para soportar diagnósticos, mantenimiento predictivo (PdM) y evaluación del estado de los

activos, favoreciendo decisiones oportunas y una mejora continua basada en evidencia (Ahmed Murtaza et al., 2024b).

La incorporación simultánea de IIoT, cloud computing y Big Data Analytics ha acelerado la transición hacia modelos de mantenimiento 4.0, donde la ejecución operativa depende de la captura, integración y análisis continuo de datos. Tal sinergia incrementa la confiabilidad, reduce la incertidumbre operativa y optimiza el uso de recursos, convirtiéndose en una palanca estratégica de competitividad industrial. La tabla 10 resume los beneficios clave del Big Data Analytics dentro del marco de mantenimiento 4.0, destacando su contribución a la anticipación de fallas y a la toma de decisiones de alto valor.

Tabla 10

Valor agregado de la Big Data Analytics en mantenimiento 4.0

Aspecto	Sin Big Data Analytics	Con Big Data Analytics
Gestión de datos	Datos aislados, desorganizados y difíciles de integrar.	Integración masiva y estructurada de datos en tiempo real desde múltiples fuentes.
Visibilidad del estado de los activos	Limitada, dependiente de inspecciones manuales.	Supervisión continua y automática mediante sensores y análisis en tiempo real.
Toma de decisiones	Basada en percepción o históricos limitados.	Decisiones basadas en analítica avanzada, algoritmos y predicción de eventos futuros.
KPIs de Mantenimiento	Medición parcial, sin trazabilidad detallada ni análisis de evolución.	KPIs enriquecidos, análisis multivariable, tendencias y alertas automáticas.
Reducción de Costos (CAPEX y OPEX)	CAPEX elevado por reemplazos prematuros. OPEX alto por fallas inesperadas, urgencias y bajo rendimiento energético.	CAPEX reducido por extensión del ciclo de vida. OPEX optimizado por eficiencia y mantenimiento predictivo.
Capacidad de Pronóstico	Nula o mínima, sin herramientas para prever eventos futuros.	Alta. Modelos predictivos permiten anticipar fallas y comportamientos anómalos.
Análisis de fallas	Subjetivo; dependen de experiencia del técnico.	Causalidad objetiva, soportada por correlaciones estadísticas y aprendizaje automático.
Escalabilidad del Sistema	Limitada, no se adapta fácilmente al crecimiento del volumen de datos.	Escalable mediante arquitecturas Big Data en la nube y procesamiento distribuido.

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

En la tabla 11 se presenta una comparación técnica de diversas tecnologías de Big Data Analytics utilizadas en la Industria 4.0, enfocadas en su aplicación al mantenimiento predictivo y prescriptivo. Se incluyen detalles de hardware, software, protocolos de comunicación, ventajas, limitaciones y aplicaciones industriales típicas.

Tabla 11

Tecnologías de Big Data Analytics aplicado a la industria 4.0

Tecnología	Hardware	Software	Protocolo	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones
Apache Hadoop	Servidores distribuidos, clusters, discos duros SAS o SSD	Hadoop, HDFS, MapReduce, YARN	REST API, HTTP, TCP/IP	Escalable, costo-efectivo, ideal para grandes volúmenes de datos	Latencia alta, no apto para datos en tiempo real	Análisis batch, historiales de mantenimiento, informes OEE
Apache Spark	Servidores con alto procesamiento o RAM/CPU, GPU	Spark SQL, MLlib, GraphX, Spark Streaming	REST API, TCP/IP, Kafka, MQTT	Procesamiento rápido en memoria, apto para datos en tiempo real	Requiere alto consumo de RAM	Detección de fallas, análisis predictivo, mantenimiento prescriptivo
Microsoft Azure Synapse / IoT Hub	Dispositivos Edge, gateways industriales, servidores cloud	Azure ML, Stream Analytics, Data Factory	MQTT, AMQP, HTTPS, OPC UA	Integración fácil con ecosistemas Microsoft, análisis en tiempo real, machine learning	Costos variables, dependencia del cloud	Predicción de fallos, control remoto, mantenimiento basado en condición
Amazon Web Services (AWS) – Kinesis / S3 / Redshift	IoT Core Gateways, EC2, Greengrass, sensores IoT	Kinesis Data Streams, QuickSight, SageMaker	MQTT, HTTP, HTTPS, LoRaWAN	Alta disponibilidad, servicios integrados, escalabilidad	Costos por uso, requiere conexión estable a Internet	Mantenimiento predictivo en líneas de producción, visualización de KPI
Google Cloud Platform – BigQuery / IoT Core	Dispositivos Edge, gateways, sensores industriales	BigQuery, Pub/Sub, Dataflow, Vertex AI	MQTT, HTTP, CoAP, WebSockets	Analítica en tiempo real, integración con IA, dashboards personalizados	Dependencia del ecosistema Google	Optimización de procesos, gestión de activos, control de desempeño
IBM Watson IoT y IBM Maximo	Dispositivos Edge, sensores conectados, PLC, gateways	IBM Watson Studio, SPSS Modeler, Maximo APM	MQTT, OPC UA, HTTP, HTTPS	Fuerte enfoque en mantenimiento, IA integrada, CMMS conectado	Costoso, curva de aprendizaje media	Mantenimiento inteligente, gestión de activos conectados, análisis de ciclos de vida

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.6 Sistemas Ciberfísicos (SFC) aplicados a mantenimiento 4.0

Los Sistemas Ciberfísicos (SFC) representan una nueva generación de integración entre el mundo físico y el digital, al vincular dispositivos, sensores y actuadores con capacidades avanzadas de computación, almacenamiento y comunicación. Su propósito es dotar a los activos industriales de inteligencia operativa, de modo que puedan intercambiar información, aprender y coordinar acciones a través de redes conectadas globalmente. En el contexto industrial, se definen como sistemas donde los elementos físicos interactúan con plataformas informáticas capaces de monitorizar procesos, procesar datos y generar respuestas automáticas o asistidas (Javaid, Haleem, Singh, et al., 2023).

Un SFC posee naturaleza dual: percibe variables reales del entorno y las transmite al espacio digital para su análisis, control o retroalimentación, ya sea en bucles abiertos o cerrados. Esta interacción se sustenta en arquitecturas que integran infraestructura energética, dispositivos de control, redes de comunicación, sistemas SCADA y algoritmos especializados para la toma de decisiones. La red juega un papel crítico, pues asegura el flujo confiable y oportuno de información entre los dominios físico y computacional (García-Valls et al., 2018).

En el marco del mantenimiento 4.0, los sistemas ciberfísicos operan como plataforma central que interconecta tecnologías habilitadoras como IIoT, computación en la nube, edge computing, inteligencia artificial y Gemelos Digitales. Su función es permitir la supervisión continua, el análisis avanzado de condición y la respuesta autónoma ante fallos o desviaciones operativas. La Tabla 12 sintetiza el aporte de los SFC en el mantenimiento industrial, resaltando su capacidad para elevar la confiabilidad, reducir tiempos de inactividad y optimizar decisiones técnicas y estratégicas.

Tabla 12

Valor agregado de los Sistemas Ciberfísicos (SFC) en mantenimiento 4.0

Categoría de Valor	Valor agregado por los SFC	Impacto en mantenimiento 4.0
Integración en tiempo real	Integración dinámica de sensores, controladores y sistemas informáticos para monitoreo constante.	Permite el mantenimiento predictivo y prescriptivo basado en datos reales.
Interoperabilidad	Conectividad fluida entre dispositivos físicos y plataformas digitales mediante estándares abiertos y middleware especializado.	Facilita la comunicación entre activos, software CMMS y sistemas ERP, plataformas de análisis y dispositivos de campo
Autonomía y autoorganización	Capacidad de tomar decisiones locales sin intervención humana, gracias a algoritmos de control inteligente e IA embebida.	Disminuye tiempos de respuesta ante fallas y optimiza la asignación de recursos.
Virtualización de activos	Representación digital en tiempo real mediante modelos virtuales (Gemelos Digitales).	Mejora la trazabilidad de fallas y facilita simulaciones de mantenimiento.
Adaptabilidad al entorno	Reacción automática ante variaciones del entorno o condiciones operativas, gracias a sistemas autoajustables.	Mejora la resiliencia operativa de los equipos críticos.
Escalabilidad modular	Posibilidad de escalar o adaptar componentes del sistema sin comprometer el funcionamiento global.	Facilita la expansión de sistemas de monitoreo y control de activos.
Visualización avanzada	Dashboards integrados con análisis en tiempo real, KPIs, y alertas inteligentes.	Mejora la toma de decisiones y reduce la dependencia de reportes manuales.
Reducción de CAPEX y OPEX	Optimización del uso de recursos, prolongación de la vida útil de activos y reducción de tiempos muertos mediante decisiones basadas en datos.	Disminuye inversiones innecesarias y gastos operativos recurrentes.

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.7 Realidad aumentada (RA) aplicada al mantenimiento 4.0

La Realidad Aumentada (RA) es una tecnología que integra contenido digital, como datos, gráficos o instrucciones, sobre el entorno físico en tiempo real, permitiendo enriquecer la percepción del usuario y facilitar la interacción con activos industriales. En el ámbito del mantenimiento 4.0, esta herramienta se vincula con IIoT, inteligencia artificial y sistemas ciberfísicos para desplegar en la línea de visión del técnico información relevante del equipo, instrucciones paso a paso y diagnósticos instantáneos, contribuyendo a reducir errores, tiempos de intervención y paradas no programadas.

Tabla 13 sintetiza el valor que aporta esta tecnología en términos de eficiencia operativa, seguridad industrial, disponibilidad de activos y disminución de costos de operación y capital.

Tabla 13

Valor agregado de la Realidad Aumentada (RA) en mantenimiento 4.0

Categoría	Valor Agregado de la RA	Impacto Técnico	Aplicación en Mantenimiento 4.0
Eficiencia operativa	Reduce tiempos de diagnóstico y reparación con datos superpuestos sobre activos.	Visualización de planos y datos IIoT en sitio mediante gafas o tablets RA.	Disminución del MTTR gracias a guía visual inmediata.
Gestión del conocimiento	Facilita transferencia know-how técnico mediante contenidos digitales y asistentes virtuales integrados	Asistencia remota en real con marcado digital, tutoriales en 3D y sistemas de entrenamiento inmersivo	Capacitación sin parar operaciones y menor dependencia de expertos.
Seguridad y prevención	Disminuye riesgos con instrucciones paso a paso y alertas en tiempo real.	RA enlazado a sensores IIOT para advertir zonas peligrosas o fallas.	Mejora de los KPIs de seguridad en tiempo real sin quitar la vista del área de intervención.
Reducción de costos	Ahorra en desplazamientos y tiempos improductivos.	Soporte remoto, formación digital y reducción de OPEX/CAPEX.	Reducción de OPEX por menor tiempo de inactividad y reducción de CAPEX al optimizar recursos
Disponibilidad de activos	Intervención precisa y rápida mediante visualización contextual.	Diagnóstico guiado por RA en sitio, conectado con historial del CMMS y datos del sensor, para diagnóstico en tiempo real	Mejora del OEE por menor tiempo fuera de servicio.
Toma de decisiones	Apoyo visual inteligente para decisiones técnicas mediante sistemas cognitivos basados en IA y RA	Proyecciones del gemelo digital y análisis predictivo en RA.	Decisiones inmediatas sin depender del centro de control.

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

A diferencia de la realidad virtual, que genera entornos completamente simulados, la RA combina elementos del mundo real con objetos virtuales fijados espacialmente mediante reconocimiento de marcadores o mediante técnicas de localización sin marcadores. Su implementación se apoya en dispositivos como gafas inteligentes, tabletas o teléfonos móviles, los cuales capturan el entorno a través de cámaras y proyectan elementos digitales vinculados al activo, manteniendo su posición relativa aun cuando el usuario se desplaza (Ceruti et al., 2019).

Dentro de una arquitectura de mantenimiento 4.0, la RA funciona como un puente cognitivo entre el técnico y los sistemas de información. Al conectarse con plataformas como Big Data Analytics, computación en la nube, SFC, CMMS y Gemelos Digitales, permite ejecutar mantenimiento asistido, soporte remoto experto, capacitación inmersiva y toma de decisiones en campo con datos procesados en tiempo real. La En la tabla 14, se describe las características de las tecnologías de Realidad Aumentada (RA) aplicado utilizado en la industria 4.0, describiendo el hardware, software, ventajas, limitaciones y aplicaciones.

Tabla 14

Tecnologías de Realidad Aumentada (RA) utilizado en la industria 4.0

Tecnología RA	Hardware	Software	Protocolos	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones
Microsoft HoloLens 2	Gafas autónomas con sensores de profundidad	Windows Holographic OS, integración con Azure y Dynamics 365	Wi-Fi, Bluetooth, REST API, Azure IoT, MQTT	Experiencia RA inmersiva, manos libres, ideal para entornos complejos	Costo elevado, autonomía limitada, curva de aprendizaje inicial	Mantenimiento predictivo, formación técnica, inspecciones aumentadas
RealWear HMT-1	Gafas con pantalla frontal, cámara HD, micrófono	Android personalizado con apps industriales de RA y soporte remoto	Wi-Fi, Bluetooth, MQTT, REST API, cifrado TLS	Alta durabilidad, comandos por voz, ideal para zonas ATEX o ruido	Campo de visión reducido, capacidades RA limitadas	Checklists visuales, SOPs interactivos, soporte remoto en campo
PTC Vuforia Studio	Compatible con HoloLens, smartphones, tablets industriales	Plataforma no-code para RA industrial, integra IoT y datos en vivo	OPC UA, REST API, MQTT, integración con ThingWorx	Fácil de usar, sin necesidad de programar, alto valor en mantenimiento	Licenciamiento costoso, dependiente del ecosistema PTC	Visualización de IoT, procedimientos guiados, control de calidad
TeamViewer Frontline (xAssist)	Compatible con RealWear, Vuzix, HoloLens y tablets RA	Asistencia remota colaborativa, RA guiada, integración CMMS	Wi-Fi, REST API, MQTT, cifrado TLS, WebRTC	Colaboración remota eficiente, rápida adopción en campo	Depende de conexión constante, funciones limitadas offline	Soporte técnico remoto, formación asistida, resolución de problemas

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.8 Gemelos Digitales (Digital Twins) aplicada al mantenimiento 4.0

Los Gemelos Digitales constituyen una réplica virtual dinámica de un activo, proceso o sistema físico, alimentada de manera continua por datos procedentes de sensores, dispositivos IoT y plataformas de control. Esta conexión bidireccional permite representar el estado real del equipo, predecir su comportamiento y optimizar su desempeño a lo largo de todo el ciclo de vida operativo (Javaid, Haleem, & Suman, 2023).

En el marco del mantenimiento 4.0, los Digital Twins funcionan como núcleo cognitivo dentro del ecosistema tecnológico, interactuando con IIoT, inteligencia artificial, Big Data Analytics y sistemas ciberfísicos para simular escenarios, ajustar parámetros operativos y validar estrategias de intervención antes de ejecutarse. Estas capacidades los convierten en una herramienta estratégica para gestionar confiabilidad, continuidad operativa y rendimiento técnico. La tabla 15 resume sus aportes en términos de valor económico, técnico y funcional para la gestión avanzada del mantenimiento.

Tabla 15

Valor agregado de los Gemelos Digitales (Digital Twins) en Mantenimiento 4.0

Categoría de Valor	Valor Agregado por los Gemelos Digitales	Impacto en Mantenimiento 4.0	Detalles Técnicos Clave
Monitoreo en Tiempo Real	Detecta anomalías operativas mediante la sincronización constante entre el activo físico y su gemelo digital.	↓ MTTR y ↑ MTBF gracias a alertas tempranas y análisis en tiempo real.	IIoT, OPC UA/MQTT, conexión a CMMS y SCADA.
Simulación Predictiva	Permite anticipar fallas y optimizar estrategias de mantenimiento basado en modelos de datos y físicos.	Facilita mantenimiento predictivo y prescriptivo.	Modelos físicos + IA, conectividad cloud, simulaciones de escenarios.
Ciclo de Vida del Activo	Trazabilidad total del activo para decisiones de mantenimiento, renovación o mejora.	Optimiza el TCO y alarga la vida útil de los activos.	Integración con BIM, PLM, ERP, historial técnico.
Interoperabilidad Tecnológica	Integra sistemas IIoT, SCADA, RA, Cloud, SFC en una sola plataforma digital.	Reduce la complejidad y mejora la eficiencia operativa.	Middleware, APIs, plataformas como Siemens MindSphere.
Reducción de Costos	Disminuye CAPEX por extensión de vida útil y OPEX por reducción de fallas e intervenciones.	↑ ROI por decisiones basadas en simulaciones y monitoreo continuo.	Evaluación TCO, análisis ROI, gestión de recursos técnicos.
Toma de Decisiones	Ofrece visualización 3D y analítica avanzada para decisiones tácticas y estratégicas.	Decisiones más precisas en mantenimiento y reemplazo.	Dashboards, BI, gemelos analíticos, integración con plataformas de análisis.

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

Su implementación se estructura a partir de tres elementos esenciales: (a) el modelo digital que describe la geometría, condiciones y atributos del activo físico; (b) el mecanismo de integración y comunicación que sincroniza datos entre el entorno real y el virtual; y (c) el módulo analítico encargado de extraer patrones relevantes y actualizar el modelo con información en tiempo real. Como resultado, el gemelo digital facilita el análisis predictivo, la evaluación de fallas potenciales y la toma de decisiones basadas en evidencias, orientadas a reducir costos y a incrementar la eficiencia (Zhong et al., 2023).

En la tabla 16, se describe las características de las tecnologías de Gemelos Digitales aplicado a la industria 4.0, hardware físico, software de modelado / simulación y protocolos de comunicación estandarizados para replicar virtualmente activos industriales en tiempo real.

Tabla 16

Tecnologías de Gemelos Digitales (Digital Twins) aplicado a la industria 4.0

Tecnología	Hardware Asociado	Software Utilizado	Protocolos	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones
Siemens MindSphere + NX (Digital Twin)	PLC SIMATIC, Sensores, Gateway IOT2050, Edge Devices	Siemens NX, MindSphere, Teamcenter	OPC UA, MQTT, Profinet, REST API	Integración vertical completa, simulación avanzada, diseño y operación sincronizados	Costoso, requiere ecosistema Siemens completo	Mantenimiento predictivo, diseño de maquinaria, gemelo de producción
GE Digital Twin (Predix)	Sensores industriales, RTUs, Edge Devices	Predix APM, GE Digital Twins Library	OPC UA, HTTPS, MQTT	Gran capacidad de analítica avanzada, IA integrada para mantenimiento predictivo	Curva de aprendizaje alta, limitado a ecosistemas compatibles	Generación eléctrica, petróleo y gas, aviación industrial
Dassault Systèmes 3DEXPERIE NCE	PLC, dispositivos de escaneo 3D, sensores, RTUs	CATIA, SIMULIA, DELMIA, ENOVIA	OPC UA, HTTPS, API, RESTful	Enfoque integral desde diseño a operación, muy preciso en simulaciones	Requiere gran capacidad computacional y formación técnica	Gemelos para plantas completas, simulación de comportamiento físico de productos
Microsoft Azure Digital Twins	IoT Edge, sensores inteligentes, gateways compatibles Azure	Azure Digital Twins, Power BI, Azure IoT Hub	MQTT, HTTPS, OPC UA	Escalabilidad en la nube, integración con BI y analítica avanzada, conectividad IoT abierta	Dependencia del ecosistema Azure, requiere conocimientos en cloud	Smart buildings, mantenimiento remoto, gestión de activos conectados
ABB Ability Digital Twin	Instrumentación ABB, Sensores industriales, Controladores IoT	ABB Ability, ABB Symphony Plus	OPC UA, Modbus, TCP, MQTT	Integración directa con sistemas ABB, enfoque en mantenimiento prescriptivo	Menos flexible fuera del ecosistema ABB	Minería, generación eléctrica, control de procesos industriales
IBM Maximo + Digital Twin Exchange	Gateways, sensores RFID, Edge Gateways	IBM Maximo, IBM Watson IoT, Digital Twin Exchange	MQTT, REST API, OPC UA	Alta integración con mantenimiento, IA y machine learning integrados	Licencias complejas, menor orientación al diseño CAD	Monitoreo de activos, salud de equipos, mantenimiento preventivo

Nota. Elaboración propia en base a las especificaciones técnicas de fabricantes

1.9 Fabricación Aditiva (FA) aplicada al mantenimiento 4.0

La Fabricación Aditiva (FA) es una tecnología de producción basada en la adición de material capa por capa a partir de un modelo digital, lo que permite generar componentes con geometrías complejas sin requerir utillaje especializado y con altos niveles de personalización. Su aplicación resulta particularmente relevante en la fabricación de series cortas y repuestos bajo demanda, ofreciendo una alternativa económicamente viable frente a métodos convencionales, especialmente en contextos de producción flexible e intervención técnica en planta (Slama et al., 2023).

En el ámbito del mantenimiento 4.0, la FA posibilita la consolidación de piezas al integrar múltiples componentes en un único elemento estructural, reduciendo peso, complejidad de ensamblaje y tiempos de fabricación. Aunque esta capacidad optimiza la funcionalidad mecánica, aún persisten brechas en la comprensión de sus efectos operativos, especialmente en la gestión estratégica de repuestos y su almacenamiento, dado que la consolidación puede incrementar el costo unitario de inventario pese a disminuir la dependencia logística (Knofius et al., 2019).

Estudios recientes destacan que la FA contribuye a la producción ágil de repuestos críticos, disminución de inventarios físicos, menores tiempos de entrega y reducción de paradas no programadas. Una revisión sistemática evidencia que la FA fortalece la gestión del mantenimiento industrial mediante aplicaciones en ingeniería inversa, toma de decisiones, impactos económicos y control de propiedad intelectual, consolidando su utilidad en la cadena de suministro de repuestos (Alzahmi et al., 2025).

No obstante, la integración de FA presenta un equilibrio técnico - económico que debe evaluarse caso a caso. Investigaciones de Knofius et al. (2019, 2021) evidencian que, aunque reduce costos logísticos y tiempos de inactividad, su adopción implica analizar limitaciones asociadas al costo energético, materiales, calidad de acabados y variabilidad operacional. En este sentido, la decisión de reemplazar métodos convencionales por FA depende del nivel de criticidad del activo, del volumen de demanda y de la viabilidad del retorno de inversión.

De manera complementaria, el uso de FA combinado con políticas avanzadas de reposición como el Problema de Reposición Conjunta (PRC) ha demostrado mejorar la gestión de inventario al permitir abastecimiento híbrido entre piezas convencionales y piezas impresas, alcanzando eficiencia siempre que los costos de impresión se mantengan dentro de rangos competitivos (Ryalat, 2025).

1.10 Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0)

El Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) es un enfoque avanzado de gestión de activos físicos que integra la planificación, ejecución, control y mejora del mantenimiento mediante tecnologías digitales habilitadoras de la Industria 4.0. Su propósito es optimizar la confiabilidad, disponibilidad y desempeño de los activos durante todo su ciclo de vida, mediante decisiones soportadas en datos en tiempo real y analítica avanzada (Werbińska-Wojciechowska et al., 2023; Achouch et al., 2022).

Este sistema combina la estructura organizacional, los roles y responsabilidades, los procesos de planificación y operación y el principio de mejora continua establecidos en la gestión de activos (UNE, 2024), con tecnologías habilitadoras como IIoT, Big Data Analytics, Inteligencia Artificial, Computación en la Nube, Edge Computing, Sistemas Ciberfísicos, Gemelos Digitales, Realidad Aumentada y plataformas CMMS/EAM. La convergencia de estos elementos permite el diagnóstico automatizado de condición, la ejecución de mantenimiento predictivo-prescriptivo y una toma de decisiones robusta, trazable y orientada al ciclo de vida del activo (Tapia et al., 2024; Zhong et al., 2023).

En consecuencia, el SGM 4.0 redefine el mantenimiento como un proceso inteligente, adaptativo y orientado a la creación de valor, capaz de anticipar fallas, optimizar recursos, minimizar costos operativos y elevar la resiliencia productiva. Esto se logra mediante un flujo continuo y bidireccional de información entre el activo físico y su representación digital, lo que habilita aprendizaje constante, intervención oportuna y mejora progresiva del desempeño (Hernández-Montero & Rodríguez-Díaz, 2023; Mosca et al., 2025).

1.10.1 Concepto de Mantenimiento 4.0

El Mantenimiento 4.0 se define como la evolución natural del mantenimiento industrial hacia un modelo digitalizado, interconectado y predictivo, sustentado en las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0. Su esencia radica en la utilización de sistemas inteligentes capaces de captar, procesar y analizar datos operativos para anticipar fallas, reducir intervenciones no planificadas y asegurar la continuidad funcional de los activos físicos. En este enfoque convergen herramientas como el Internet de las Cosas, la inteligencia artificial, el análisis de grandes volúmenes de datos, los sistemas ciberfísicos y los Gemelos Digitales, cuyo propósito es optimizar

recursos, elevar la disponibilidad y mejorar el desempeño global de los equipos (Nasirinejad et al., 2025).

Este paradigma no solo introduce nuevas tecnologías, sino que transforma la manera de planificar y ejecutar las estrategias de mantenimiento. Al integrar capacidades analíticas avanzadas como aprendizaje automático, monitoreo continuo y modelos predictivos, el Mantenimiento 4.0 permite una gestión más precisa, adaptable y orientada a resultados. Su aplicación contribuye a incrementar la vida útil de los activos, disminuir tiempos de parada y fortalecer la eficiencia económica y operativa dentro de las organizaciones (Di Nardo et al., 2024).

1.10.2 Ventajas competitivas de la adopción de Mantenimiento 4.0

La adopción del Mantenimiento 4.0 en entornos industriales se posiciona como un factor clave para mejorar el rendimiento productivo, ya que permite reducir tiempos de inactividad, optimizar la disponibilidad operativa de los equipos y contribuir al cumplimiento de los objetivos de producción (Essalih et al., 2025a). Este enfoque, sustentado en los principios de la Industria 4.0, promueve una transición desde esquemas reactivos o periódicos hacia estrategias predictivas y prescriptivas que incrementan la eficiencia del proceso productivo y disminuyen costos de operación (Fallahiazoudar et al., 2025).

La literatura señala que el Mantenimiento 4.0 supera limitaciones de métodos tradicionales al prolongar la vida útil de los activos, evitar paradas no programadas, minimizar intervenciones planificadas y reducir el consumo energético y de recursos. A ello se suma su aporte en esferas estratégicas como ciclo de vida del producto, servicios posventa, eficiencia de recursos, gestión logística, utilización de activos y soporte técnico remoto (Jasiulewicz-Kaczmarek & Gola, 2019). Además, tecnologías como IoT, análisis avanzado de datos y realidad aumentada facilitan la intervención oportuna, el aprendizaje técnico en campo y la colaboración entre especialistas.

De acuerdo con Jasiulewicz-Kaczmarek y Gola (2019), el Mantenimiento 4.0 representa una alternativa superior frente a estrategias convencionales al permitir mayor tiempo de servicio de los equipos, prevenir fallas inesperadas, reducir intervenciones programadas y mejorar tanto la seguridad operativa como la eficiencia en el uso de energía y materiales. Desde el enfoque de sostenibilidad

industrial, su impacto se manifiesta en varias dimensiones clave de la gestión productiva.

En el ciclo de vida producto-servicio, el acceso centralizado a datos operativos permite a los fabricantes desarrollar modelos predictivos más precisos y fortalecer procesos de mejora continua mediante IIoT. En el ámbito de servicios y posventa, las capacidades de diagnóstico y mantenimiento remoto contribuyen a disminuir los costos operativos entre un 10 % y 40 %. Respecto a la gestión de recursos y procesos, la predicción del estado de los equipos y el monitoreo energético favorecen la estabilidad del proceso y el rendimiento económico.

En inventarios, la conectividad mejora la disponibilidad oportuna de repuestos críticos. En utilización de activos, las estrategias predictivas reducen entre 30 % y 50 % el tiempo total de inactividad y prolongan la vida útil de maquinaria entre 20 % y 40 %. Finalmente, en la dimensión de mano de obra, la realidad aumentada facilita instrucciones visuales, diagnóstico asistido y soporte experto remoto, lo que disminuye la carga de trabajo y acelera la resolución de fallas.

Según Di Nardo et al. (2024), la incorporación del mantenimiento prescriptivo dentro del marco de la Industria 4.0 transforma la relación entre mantenimiento y producción al introducir capacidades avanzadas de análisis y toma de decisiones. En primer lugar, la integración de sensores y sistemas conectados permite capturar datos en tiempo real, los cuales pueden ser procesados mediante algoritmos de aprendizaje automático para estimar la probabilidad de fallas y definir acciones oportunas. Esto habilita decisiones más certeras y un diagnóstico anticipado de problemas operativos.

En términos de confiabilidad, el mantenimiento prescriptivo reduce interrupciones no planificadas, aumenta la disponibilidad de los activos y facilita la programación de intervenciones durante paradas planificadas, disminuyendo costos asociados a mantenimientos reactivos. Esta optimización del ciclo operativo se traduce en un uso más eficiente de recursos, menos reemplazos prematuros de componentes y una planificación mantenible con menor impacto económico.

Asimismo, la Industria 4.0 mejora la coordinación entre áreas productivas y de mantenimiento, promoviendo el intercambio de información en tiempo real y favoreciendo una gestión colaborativa. La flexibilidad también aumenta, ya que los planes de intervención pueden ajustarse a las necesidades específicas del sistema y a las variaciones del entorno productivo. Finalmente, el enfoque prescriptivo

impulsa el aprendizaje continuo mediante la retroalimentación de datos históricos, lo que fortalece la capacidad predictiva del sistema y favorece ciclos de mejora permanente orientados a la eficiencia global del proceso.

1.11 Modelos multicriterio para la toma de decisiones en mantenimiento

La toma de decisiones multicriterio (MCDM) constituye un enfoque analítico y sistematizado para seleccionar alternativas cuando intervienen simultáneamente criterios cuantitativos y cualitativos. Este tipo de metodología es especialmente relevante en mantenimiento industrial, dado que las decisiones relacionadas con activos físicos suelen implicar criterios como el costo, confiabilidad, criticidad, riesgo operativo, disponibilidad y sostenibilidad. Estudios de análisis bibliográfico evidencian que, dentro de las técnicas aplicadas, el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) es el método individual más empleado, mientras que los esquemas MCDM híbridos ocupan el segundo lugar en uso debido a su capacidad para fortalecer resultados de priorización y ranking (Mardani et al., 2015).

El AHP, desarrollado por Thomas L. Saaty, estructura el proceso decisional en niveles jerárquicos (objetivo, criterios y alternativas) y permite asignar pesos mediante comparaciones pareadas, obteniendo así prioridades relativas a través del cálculo del autovector principal de la matriz de juicios (Karayalcin, 1982). Este método es ampliamente utilizado en mantenimiento, ya que posibilita integrar el conocimiento experto con indicadores operacionales, facilitando la selección de estrategias, priorización de equipos y definición de intervenciones según criticidad, impacto operativo y costos (Essalih et al., 2025b)

Sin embargo, AHP se ubica dentro de un conjunto más amplio de técnicas multicriterio. Métodos como TOPSIS, VIKOR, PROMETHEE y ANP han obtenido reconocimiento en ingeniería de mantenimiento debido a su capacidad para ordenar alternativas según distancia al ideal, generar soluciones de compromiso o modelar interdependencias entre criterios. Por ejemplo, TOPSIS resulta eficaz cuando se requiere ordenar alternativas en función de su cercanía a una solución ideal, especialmente si los pesos han sido previamente determinados mediante AHP (Ighravwe & Oke, 2019). En esa línea, la literatura reciente destaca el uso de métodos híbridos —como AHP–TOPSIS o ANP–TOPSIS— que aumentan la robustez de la decisión, integrando ponderación

estructurada con algoritmos de ranking (Tukino & Prastyo, 2024; Eltarabishi & El-Azab, 2020).

La irrupción de la Industria 4.0 ha reforzado el valor de los modelos multicriterio al evaluar el impacto tecnológico en mantenimiento. Investigaciones aplicadas demuestran el uso de AHP y variantes difusas (Fuzzy-AHP) para jerarquizar tecnologías como IIoT, Big Data Analytics, Gemelos Digitales, mantenimiento predictivo asistido por IA y plataformas de sensorización en tiempo real, analizando su repercusión en confiabilidad, eficiencia operativa y costos del ciclo de vida (Franciosi et al., 2018). Bajo esta perspectiva, la combinación AHP–Fuzzy-TOPSIS se ha posicionado como una estrategia idónea para priorizar tecnologías 4.0 mediante ponderaciones flexibles y rankings estables (Pour & Shafiei, 2023; Torbacki & Kijewska, 2025).

En consecuencia, la literatura evidencia que los modelos multicriterio basados en AHP con posible integración de métodos complementarios constituyen un marco riguroso para evaluar el impacto de las tecnologías emergentes de Industria 4.0 en el mantenimiento de activos físicos.

1.12 Modelos de madurez en la Industria 4.0

Un modelo de madurez es una técnica que permite medir diversos aspectos organizacionales e identificar el estado actual de sus procesos, funcionando como punto de partida para la mejora empresarial. En el ámbito de la Industria 4.0, estos modelos suelen denominarse modelos de evaluación de preparación, hojas de ruta, marcos de referencia o índices de madurez, y su propósito es determinar la capacidad actual de una unidad organizativa para adoptar e implementar los principios de la Industria 4.0 en el futuro (Angreani et al., 2020).

Según Angreani et al. (2020), una revisión sistemática de modelos de madurez para Industria 4.0 identificó 17 estudios clave y determinó que sus dimensiones se agrupan en nueve categorías principales: estrategia, liderazgo, clientes, productos, operaciones, cultura, personas, gobernanza y tecnología. La mayoría de modelos utiliza entre cuatro y seis niveles de madurez, resaltando con mayor frecuencia las dimensiones tecnológicas y operativas, mientras que liderazgo y cultura son menos consideradas. Los modelos de madurez permiten evaluar la evolución de los procesos y predecir el desempeño organizacional. En mantenimiento, se han desarrollado múltiples que estructuran prácticas y etapas para identificar oportunidades de mejora y fortalecer la

gestión. Estos modelos, con distintos niveles y clases, se han consolidado como herramientas clave para medir la madurez del mantenimiento en las organizaciones (De Andrade et al., 2022).

En la Tabla 17 se presentan diferentes modelos de madurez de la Industria 4.0, incluyendo las dimensiones y los niveles que consideran.

Tabla 17

Normativas y estándares relacionados a mantenimiento 4.0

Modelo de Madurez (MM)	Enfoque / Dimensiones
The Connected Enterprise Maturity Model	4 dimensiones, 5 niveles de madurez
Guideline Industrie 4.0	2 dimensiones con 6 subdimensiones cada una, 5 niveles
Industrie 4.0 Readiness Model	6 dimensiones, 18 campos asociados, 6 niveles
Maturity Model to Industry 4.0	3 dimensiones, 5 niveles
Smart Manufacturing System Readiness Level (SMSRL)	4 dimensiones, 6 niveles
SIMMI 4.0 – System Integration Maturity Model Industry 4.0	4 dimensiones, 5 niveles
The Industry 4.0 / Digital Operations Self-Assessment	6 dimensiones, 4 niveles
Industry 4.0 maturity of industrial enterprises	9 dimensiones, 6 indicadores, 5 niveles
Industry 4.0-MM	5 dimensiones, 6 niveles
Smartness Assessment Model	4 dimensiones, 10 subdimensiones, 3 niveles
acatech Industrie 4.0 Maturity Index	6 dimensiones, 4 áreas estructurales + 5 funcionales, 6 niveles
Industry 4.0 Maturity Model	3 dimensiones, 4 niveles
DREAMY (Digital Readiness Assessment Maturity Model)	5 dimensiones, 5 niveles
methodology for modeling and assessing human machine interaction with cyber-physical systems	6 dimensiones, niveles variables (3-7 niveles por dimensión)
Adoption Maturity Model for I4.0	5 dimensiones, 5 niveles
360 Digital Maturity Model (3DMMA)	6 dimensiones, 5 niveles
Framework of the adoption patterns of Industry 4.0	5 dimensiones, niveles variables entre 3-4

Nota. Adaptado de (Angreani et al., 2020)

Según De Andrade et al. (2022), los modelos de madurez en mantenimiento se apoyan en un conjunto de acciones clave que abarcan cultura organizacional, políticas de mantenimiento, gestión del desempeño, análisis de fallas, planificación preventiva, uso de CMMS, gestión de repuestos, estandarización documental, desarrollo del personal y control de resultados. Estas acciones estructuran la mejora continua y permiten

consolidar prácticas de mantenimiento más sistemáticas y eficientes (De Andrade et al., 2022).

Ferreira et al. (2024) destacan que evaluar la madurez organizacional es esencial para comparar el desempeño con referentes competitivos y orientar acciones de mejora. Los modelos de madurez permiten analizar el nivel gerencial y tecnológico, especialmente en Industria 4.0, definiendo estrategias, recursos y cambios necesarios para avanzar hacia niveles superiores y fortalecer la competitividad en entornos dinámicos (Ferreira et al., 2024).

Ferreira et al. (2024) proponen un modelo de madurez para evaluar la adopción de Industria 4.0 en el sector textil, basado en una revisión de la literatura y en la selección de criterios ante la falta de consenso sobre parámetros estandarizados. El modelo, replicable en distintos contextos, se estructura en cinco criterios y quince subcriterios que abarcan estrategia, tecnología, sostenibilidad, personas y liderazgo (Ferreira et al., 2024).

1.13 Indicadores clave de rendimiento (KPIs) en mantenimiento: fundamentos para medir desempeño

En un sistema de gestión de mantenimiento, los KPIs cumplen un rol central: permiten medir desempeño, detectar desviaciones, priorizar mejoras, justificar inversiones y alinear el mantenimiento con objetivos de negocio. Un desafío recurrente es que el desempeño del mantenimiento es multidimensional (técnico, económico y organizacional) y requiere indicadores coherentes con la estrategia y con la realidad operacional (Muchiri et al., 2011a).

Estudios empíricos sobre uso de indicadores en empresas muestran que los KPIs más comunes siguen siendo MTBF, MTTR, disponibilidad, costos y cumplimiento; sin embargo, se observan debilidades típicas: falta de estandarización, baja trazabilidad a decisiones y limitaciones de calidad del dato (lo cual es crítico en Industria 4.0) (Oliveira et al., 2016).

Para Mantenimiento 4.0, un KPI no se limita a medir; debe ser accionable y conectarse con un mecanismo de decisión. En contextos Industria 4.0, se enfatiza el uso de tableros y visualización para acortar la distancia entre medición y acción, integrando señales de múltiples fuentes (sensores, SCADA/CMMS, producción, calidad) (Pilar Lambán et al., 2022).

Además, se reconoce explícitamente el problema de la incertidumbre en KPIs derivados de datos heterogéneos (sensores, estimaciones, registros manuales), proponiéndose enfoques para modelar y comunicar esa incertidumbre, lo cual es clave para decisiones robustas (Pilar Lambán et al., 2022).

1.13.1 Marco conceptual de KPIs

a) Eficiencia Global del Equipo (OEE): el Overall Equipment Effectiveness (OEE) es un indicador compuesto que evalúa la eficiencia integral de un equipo productivo, integrando pérdidas asociadas a fallas, paradas, reducción de velocidad y defectos de calidad. Es ampliamente utilizado como KPI frontera entre producción y mantenimiento (Lundgren et al., 2020; Muchiri et al., 2011b). En entornos de Mantenimiento 4.0, el OEE se nutre de datos en tiempo real provenientes de sensores, SCADA y sistemas MES, permitiendo análisis dinámicos de pérdida (Silvestri et al., 2020b).

$$OEE = A \times P \times Q$$

Donde:

Disponibilidad (A):

$$A = \frac{\text{Tiempo de operacion real}}{\text{Tiempo de operacion planificada}}$$

Desempeño (P):

$$P = \frac{\text{Produccion real}}{\text{Produccion teorica maxima}}$$

Calidad (Q):

$$Q = \frac{\text{Unidades buenas}}{\text{Unidades producidas}}$$

b) MTBF – Mean Time Between Failures (Tiempo medio entre fallas): Indicador clásico de confiabilidad, utilizado para medir el tiempo promedio de operación entre fallas funcionales. Este indicador es fundamental para evaluar la efectividad de estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo (Muchiri et al., 2011b)

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo de operacion}}{\text{N}^\circ \text{ de fallas}}$$

c) MTTR – Mean Time To Repair (Tiempo medio de reparación): mide la mantenibilidad del activo y la eficiencia del proceso de reparación. La reducción del MTTR se asocia al uso de diagnóstico avanzado, soporte digital y planificación eficiente, característicos del Mantenimiento 4.0 (Silvestri et al., 2020)

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo de reparacion}}{\text{N}^\circ \text{ de paradas correctivas}}$$

- d) MTBS – Mean Time Between Stops (Tiempo medio entre paradas):** el MTBS amplía el concepto de confiabilidad al incluir todas las paradas, tanto por fallas como por microparadas operativas. Este indicador es especialmente relevante en sistemas automatizados y líneas de producción continua, donde las microparadas impactan significativamente el OEE (Lundgren et al., 2020)

$$MTBS = \frac{\text{Tiempo de operacion}}{\text{N}^\circ \text{ de paradas totales}}$$

- e) Disponibilidad operacional (A₀) (forma basada en tiempos):** la disponibilidad operacional es uno de los principales resultados esperados del mantenimiento eficaz (Muchiri et al., 2011b)

$$A_0 = \frac{\text{Tiempo de operacion}}{\text{Tiempo de operacion} + \text{Tiempo de indisponibilidad}}$$

O, en función de MTBF y MTTR

$$A_0 = \frac{MTBS \times 100\%}{MTBS + MTTR}$$

- f) Utilización del equipo:** la utilización mide el grado de aprovechamiento del tiempo disponible del activo. Este KPI permite distinguir pérdidas atribuibles al mantenimiento de aquellas asociadas a decisiones de planificación o demanda (Lundgren et al., 2020).

$$U\% = \frac{\text{Tiempo de operacion real}}{\text{Tiempo disponible}} \times 100\%$$

- g) Cumplimiento del plan de mantenimiento:** Indicador clave de disciplina organizacional y estabilidad del sistema de mantenimiento (Oliveira et al., 2016).

$$SC(\%) = \frac{\text{OT ejecutados segun el plan}}{\text{OT planificados}} \times 100$$

- h) Ratio de costo de mantenimiento respecto al valor de reemplazo (RCM):** la literatura de desempeño del mantenimiento destaca la necesidad de indicadores económicos vinculados a valor y estrategia (Muchiri et al., 2011b).

$$RCM = \frac{\text{Costo de mantenimiento anual}}{\text{Valor de reemplazo del activo}}$$

En “smart maintenance” y mantenimiento 4.0, además de los KPIs clásicos, se recomienda medir efectos del despliegue inteligente: rapidez del diagnóstico, calidad de decisiones, impactos en productividad/servicio y sostenibilidad del desempeño. Esto

exige indicadores seleccionados con enfoque multifactor y orientación a efectos, no solo a actividad (Lundgren et al., 2020).

La literatura reciente enfatiza que, en Mantenimiento 4.0, los KPIs deben emplearse como instrumentos de control dinámico, integrados a ciclos de mejora continua y soportados por datos confiables. Asimismo, se reconoce la necesidad de considerar la incertidumbre de los indicadores, especialmente aquellos derivados de sensores y modelos predictivos (Souifi et al., 2022).

1.14 Indicadores económicos y evaluación financiera en Mantenimiento 4.0

1.14.1 CAPEX y OPEX en mantenimiento

En el contexto del Mantenimiento 4.0, la evaluación económica de las iniciativas de digitalización y mantenimiento predictivo requiere distinguir entre los costos de inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos recurrentes (OPEX), en coherencia con el enfoque de costo del ciclo de vida (Life Cycle Cost, LCC). Según Utne, (2009), esta distinción permite analizar de manera integral el impacto económico de las decisiones de mantenimiento a lo largo de la vida útil del activo.

- a) **CAPEX (Capital Expenditure):** inversión inicial.

$$\text{CAPEX} = \sum_{i=1}^n C_i^{\text{inv}}$$

Donde

C_i^{inv} : costo de inversión del componente

n: número total de componentes de inversión

- b) **OPEX (Operational Expenditure):** costos anuales o recurrentes para operar y sostener.

$$\text{OPEX} = \sum_{i=1}^n C_i^{\text{oper}}$$

1.14.2 Cálculo de beneficios netos (BN), ROI y métricas de retorno

- a) **Beneficio Neto (BN) anual / por periodo:** de acuerdo con Meng et al. (2022), el beneficio neto de un proyecto de mantenimiento predictivo o digitalizado se define como la diferencia entre los beneficios económicos cuantificados y los costos asociados durante un periodo t.

En un análisis costo-beneficio, se define para cada año t: beneficios (B_t), costos (C_t) y inversión inicial CAPEX (normalmente en t=0)

$$BN_t = B_t - C_t$$

Donde B_t suele incluir beneficios medibles atribuibles a mantenimiento, tales como: ahorro por reducción de paradas no programadas, ahorro por reducción de fallas, ahorro por optimización de repuestos, mejora por reducción de scrap, etc.

Beneficio neto acumulado.

$$BN_{acum} = \sum_{t=i}^T BN_t$$

b) ROI (Return on Investment)

Modelos de evaluación económica para PdM en literatura plantean explícitamente el ROI como parte de un enfoque CBA (cost–benefit analysis), comparando costos de tecnología y operación contra beneficios por reducción de fallas, downtime y mantenimiento innecesario (Meng et al., 2022b).

El ROI mide cuánto se gana neto por cada sol invertido. La forma más general (sin descuento) es:

$$ROI\% = \frac{\text{Ganancia neto}}{\text{Inversion total}} \times 100$$

Los costos operativos del $OPEX_t$ es:

$$\text{Beneficios totales: } \sum_{t=1}^T B_t$$

$$\text{Costos totales: } CAPEX + \sum_{t=1}^T OPEX_t$$

$$\text{Beneficio neto total (BN): } BN = \sum_{t=1}^T B_t - (CAPEX + \sum_{t=1}^T OPEX_t)$$

Una formulación estándar para ROI sobre el horizonte T es:

$$ROI\% = \frac{\sum_{t=1}^T B_t - (CAPEX + \sum_{t=1}^T OPEX_t)}{CAPEX + \sum_{t=1}^T OPEX_t} \times 100$$

En forma incremental

$$ROI\% = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta B_t - (CAPEX - \sum_{t=1}^T \Delta OPEX_t)}{CAPEX + \sum_{t=1}^T \Delta OPEX_t} \times 100$$

1.15 Normativas y estándares relacionados a sistema de gestión de mantenimiento

En la tabla 18 se detallada de normas y estándares relacionados al Sistema de gestión de Mantenimiento 4.0, junto con una breve descripción de cada uno. Estas normas proporcionan un marco clave para alinear estrategias, procesos y tecnologías dentro de un enfoque moderno y digitalizado del mantenimiento.

Tabla 18

Normativas y estándares relacionados a mantenimiento 4.0

Normativas / Estándar	Descripción
ISO 55000:2024 / UNE-ISO 55000:2025, Gestión de activos — Información general, principios y terminología	Establece los conceptos fundamentales, principios y terminología de la gestión de activos, proporcionando el marco conceptual para alinear el mantenimiento con la estrategia organizacional y el enfoque de ciclo de vida del activo.
ISO 55001:2024 / UNE-ISO 55001:2024, Gestión de activos — Sistemas de gestión — Requisitos	Define los requisitos certificables para un Sistema de Gestión de Activos, integrando el mantenimiento como proceso clave para la generación de valor y la toma de decisiones basadas en datos.
ISO 55002:2018 / UNE-ISO 55002:2020, Gestión de activos — Sistemas de gestión — Directrices para la aplicación de la ISO 55001	Proporciona orientación práctica para la implementación de los requisitos de la ISO 55001 y su integración con los procesos de mantenimiento.
ISO 55013:2024 – Gestión de activos: orientación sobre la gestión de datos de activos.	Norma internacional que proporciona directrices para la gestión de datos en el contexto de la gestión de activos, enfatizando el tratamiento de los datos como activos organizacionales que respaldan la toma de decisiones y la efectividad del sistema de gestión de activos
UNE-EN 16646:2020, Mantenimiento — Mantenimiento dentro de la gestión de activos físicos	Establece cómo el mantenimiento debe alinearse con la gestión de activos físicos, conectando la estrategia organizacional con la ejecución operativa.
UNE-EN 17485:2021, Mantenimiento — Marco de mantenimiento para la gestión de activos físicos	Define el marco para la planificación y ejecución del mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del activo, actuando como puente entre la gestión de activos y el mantenimiento.
UNE-EN 13306:2018, Mantenimiento — Terminología del mantenimiento	Normaliza la terminología del mantenimiento, asegurando coherencia técnica y documental en los sistemas de gestión.
UNE-EN 15341:2020, Mantenimiento — Indicadores clave de desempeño del mantenimiento (KPIs)	Establece indicadores para evaluar la eficiencia, eficacia y desempeño del mantenimiento.
IEC 60300-3-11, Gestión de la confiabilidad — Guía de aplicación — Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	Proporciona directrices para la aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad dentro del ciclo de vida del activo.
IEC 60812:2018, Análisis de modos de fallo y efectos (AMFE/AMFEC)	Define la metodología para el análisis de modos de fallo, efectos y criticidad, base del mantenimiento basado en confiabilidad.
IEC 62264 / ISA-95, Integración de los sistemas empresariales y de control	Establece el marco para la integración entre sistemas de control industrial (SCADA/MES) y sistemas de gestión empresarial (ERP).
IEC 62541 (serie), Arquitectura Unificada OPC (OPC UA)	Estándar para el intercambio seguro e interoperable de datos industriales en tiempo real, habilitador del IIoT y del mantenimiento basado en datos.
ISO/IEC 30141:2018, Internet de las Cosas (IoT) — Arquitectura de referencia	Define una arquitectura de referencia para IoT, aplicable a IIoT y sistemas de mantenimiento inteligente.
ISO 23247 (serie), Marco de gemelos digitales para la fabricación	Proporciona el marco normativo para el desarrollo y uso de gemelos digitales aplicados a manufactura y mantenimiento predictivo.
IEC 62890, Gestión del ciclo de vida de sistemas y productos utilizados en la automatización y el control de procesos industriales	Establece directrices para la gestión del ciclo de vida de sistemas industriales y de automatización.
ISO/IEC 27001:2022, Sistemas de gestión de la seguridad de la información — Requisitos	Define requisitos para proteger la información crítica de operación y mantenimiento.
IEC 62443 (serie), Redes de comunicación industrial — Seguridad de redes y sistemas	Norma clave de ciberseguridad industrial para sistemas de automatización, SCADA e IIoT.
ISO/IEC 38505-1, Gobernanza de datos — Parte 1: Aplicación de la ISO/IEC 38500 a la gobernanza de los datos	Proporciona lineamientos para la gobernanza de datos organizacionales y la toma de decisiones basadas en datos.
ISO/IEC 22989:2022, Inteligencia artificial — Conceptos y terminología	Define los conceptos fundamentales de inteligencia artificial aplicables a analítica avanzada y mantenimiento predictivo.
ISO/IEC 23894:2023, Inteligencia artificial — Gestión de riesgos	Establece directrices para la gestión de riesgos asociados al uso de IA en sistemas industriales.
IEC 62443-4-2:2019 Technical security requirements for IACS components	Establece requisitos técnicos de seguridad para dispositivos como sensores, PLCs y gateways en infraestructuras de mantenimiento inteligente.

Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO II

IMPACTO DE LAS TECNOLOGÍAS DE INDUSTRIA 4.0 EN EL MANTENIMIENTO DE ACTIVOS FÍSICOS

La Industria 4.0 ha transformado la gestión del mantenimiento, permitiendo pasar de enfoques reactivos y preventivos hacia modelos predictivos basados en datos. Esta evolución incorpora tecnologías digitales que mejoran la detección temprana de fallas, aumentan la disponibilidad de los activos y optimizan el ciclo de vida operativo.

En entornos industriales, la reducción de costos de mantenimiento es un objetivo estratégico que depende cada vez más de la integración tecnológica. Sin embargo, las tecnologías habilitadoras no generan impactos equivalentes, por lo que resulta necesario medir y comparar su contribución económica y operativa.

Este capítulo evalúa siete tecnologías clave de la Industria 4.0 aplicadas al mantenimiento de activos físicos: IIoT, Computación en la Nube, Big Data Analytics, Sistemas Ciberfísicos, Realidad Aumentada, Gemelos Digitales y Fabricación Aditiva. La priorización se realiza mediante el método Analytic Hierarchy Process (AHP), tomando como criterio principal la reducción de costos de mantenimiento.

2.1 Evaluación de impacto de las tecnologías de industria 4.0 en el mantenimiento de activos físicos

A fin de determinar cuáles tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 generan un mayor impacto en la gestión del mantenimiento de activos físicos, se aplica el método Analytic Hierarchy Process (AHP) o Proceso de Jerarquía Analítica. Este método, desarrollado por Thomas Saaty, permite evaluar de manera estructurada diversas alternativas tecnológicas considerando un criterio de evaluación único: la reducción de costos de mantenimiento.

El objetivo es priorizar aquellas tecnologías que contribuyen en mayor medida a disminuir los costos operativos (OPEX) y de capital (CAPEX), mejorando la disponibilidad, confiabilidad y eficiencia de los activos.

2.1.1 Tecnologías evaluadas

Las tecnologías habilitadoras consideradas en el análisis son las siguientes:

- Internet Industrial de las Cosas (IIoT)
- Computación en la Nube
- Big Data Analytics
- Sistemas Ciberfísicos (SFC)
- Realidad Aumentada (RA)
- Gemelos Digitales (GD)
- Fabricación Aditiva (FA)

2.1.2 Criterio de evaluación

El criterio seleccionado para la comparación es la reducción de costos de mantenimiento (%), entendido como el grado en que cada tecnología contribuye a disminuir los costos totales asociados al mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo.

La evaluación cuantitativa se realiza en función del impacto relativo de cada tecnología sobre los componentes de costo directo (mano de obra, repuestos, tiempo de parada) e indirecto (fallas, reprocesos, pérdidas de disponibilidad).

2.1.3 Definición de escala de calificación

Para comparar dos tecnologías 4.0 a la vez respecto al criterio de reducción de costos, se utiliza la escala fundamental de Saaty, que cuantifica la importancia relativa o el grado de impacto de una alternativa frente a otra.

- 1: Igual importancia o impacto
- 3: Moderada importancia o impacto superior de una sobre otra
- 5: Fuerte importancia o impacto significativamente mayor
- 7: Muy fuerte o demostrada superioridad
- 9: Importancia o impacto extremo
- 2, 4, 6, 8: Valores intermedios entre los anteriores
- $1/n$: Si A es n veces más importante que B, entonces B tiene una importancia de $1/n$ frente a A

2.1.4 Consideraciones para definir el impacto inicial de cada tecnología

Para la reducción de costos de mantenimiento atribuibles a cada tecnología, se considera lo siguiente:

- **IloT:** permite integrar sensores y redes industriales para adquirir datos operativos en tiempo real, mejorando la visibilidad del estado de los activos, anticipando fallas y optimizando la planificación para reducir tiempos de inactividad
- **Computación en la Nube:** disminuye los costos de infraestructura IT local y permite análisis centralizados con acceso remoto seguro.
- **Big Data Analytics:** analiza grandes volúmenes de datos para identificar patrones de fallas, estimar vida útil remanente (RUL) y optimizar estrategias de mantenimiento predictivo.
- **Sistemas Ciberfísicos (SFC):** integran sensores, actuadores y control inteligente, habilitando sistemas autónomos de mantenimiento y respuesta en tiempo real.
- **Realidad Aumentada (RA):** reduce errores humanos y tiempos de reparación (MTTR) mediante instrucciones visuales y asistencia remota.
- **Gemelos Digitales (GD):** simulan el comportamiento real del activo, predicen fallas y optimizan estrategias de mantenimiento basadas en escenarios virtuales.
- **Fabricación Aditiva (FA):** permite la fabricación rápida de repuestos críticos, disminuyendo inventarios y tiempos de parada no programada.

2.1.5 Construcción de la matriz de comparación por pares

Para definir la matriz de comparación por pares, en la tabla 19, se considera los siguientes criterios con el fin de reducir de costos de mantenimiento:

a) Internet Industrial de las Cosas (IloT)

- **IloT vs Computación en la Nube:** el IloT reduce OPEX mediante la automatización de la adquisición de datos, pero la Nube posibilita un impacto dual (OPEX y CAPEX) gracias a la virtualización y centralización de procesos. La Nube tiene moderada superioridad (valor 3).
- **IloT vs Big Data Analytics:** el IloT recolecta datos; Big Data los analiza, predice fallas y optimiza decisiones, extendiendo la vida útil de los activos. Big Data presenta fuerte superioridad (valor 5).
- **IloT vs Sistemas Ciberfísicos (SFC):** los SFC integran al IloT dentro de un sistema autónomo que ejecuta decisiones en tiempo real, reduciendo fallas y paradas no programadas. SFC con muy fuerte superioridad (valor 7).

- **IloT vs Realidad Aumentada (RA):** la RA genera ahorros inmediatos reduciendo MTTR y errores humanos, con mayor efecto directo en OPEX. RA tiene fuerte superioridad (valor 5).
- **IloT vs Gemelos Digitales (GD):** los GD utilizan datos del IloT, pero incorporan simulación y optimización del ciclo de vida del activo, impactando CAPEX y ROI. GD con muy fuerte superioridad (valor 7).
- **IloT vs Fabricación Aditiva (FA):** la FA reduce tiempos de parada por repuestos críticos y costos logísticos, pero depende de la demanda y del tipo de activo. Su impacto es tangible pero menos sistémico. FA con moderada superioridad (valor 3).

b) Computación en la Nube (Cloud Computing)

- **Nube vs Big Data Analytics:** la Nube habilita el procesamiento remoto, pero Big Data extrae valor de los datos y mejora decisiones predictivas. Big Data con moderada superioridad (valor 3).
- **Nube vs SFC:** los SFC integran la Nube dentro de su arquitectura inteligente, cerrando el ciclo entre datos y acciones. SFC con fuerte superioridad (valor 5).
- **Nube vs RA:** la Nube proporciona infraestructura, mientras que RA impacta directamente en la ejecución del mantenimiento reduciendo MTTR. RA con moderada superioridad (valor 3).
- **Nube vs GD:** los GD utilizan la Nube como plataforma de soporte, pero añaden simulación y analítica avanzada para optimizar estrategias. GD con fuerte superioridad (valor 5).
- **Nube vs FA:** la Nube mejora el flujo de información, pero la FA impacta físicamente en la reducción de tiempos muertos. FA con ligera superioridad (valor 2).

c) Big Data Analytics

- **Big Data vs SFC:** Big Data analiza; los SFC actúan. Los SFC logran decisiones autónomas y optimización integral de planta. SFC con moderada superioridad (valor 3).
- **Big Data vs RA:** RA depende del análisis de Big Data para brindar información contextual. Sin analítica, su impacto es limitado. Big Data con ligera superioridad (valor 2).

- **Big Data vs GD:** los GD integran el análisis de Big Data con simulación del ciclo de vida, elevando su efecto económico. GD con moderada superioridad (valor 3).
- **Big Data vs FA:** aunque Big Data mejora la planificación, FA reduce directamente el costo por parada y logística. FA y Big Data con importancia similar (valor 1).

d) **Sistemas Ciberfísicos (SFC)**

- **SFC vs RA:** los SFC son el sistema madre que integra sensores, control y visualización (RA). SFC con fuerte superioridad (valor 5).
- **SFC vs GD:** el SFC opera a nivel sistémico, mientras que el GD se enfoca en el activo individual. Ambos se complementan, aunque el SFC tiene una leve ventaja jerárquica. SFC con ligera superioridad (valor 2).
- **SFC vs FA:** la FA tiene un impacto puntual; el SFC optimiza todo el sistema en tiempo real. SFC con fuerte superioridad (valor 5).

e) **Realidad Aumentada (RA)**

- **RA vs GD:** RA genera beneficios inmediatos en campo, pero el GD ofrece impacto estratégico y predictivo sobre el ciclo de vida. GD con moderada superioridad (valor 3).
- **RA vs FA:** ambas reducen OPEX, pero FA evita paradas prolongadas por falta de repuestos, mientras que RA reduce tiempo de intervención. FA con ligera superioridad (valor 2).

f) **Gemelos Digitales (GD)**

- **GD vs FA:** el GD anticipa y previene la necesidad de repuestos mediante simulación predictiva, mientras que la FA los produce a demanda. En conjunto, GD tiene mayor impacto en planificación estratégica. GD con moderada superioridad (valor 3).

g) **Fabricación Aditiva (FA)**

- Actúa como tecnología complementaria, potenciando la continuidad operativa y la respuesta rápida ante contingencias de mantenimiento. Aunque su impacto digital es indirecto, su efecto tangible sobre el OPEX y la disponibilidad es significativo.

Tabla 19*Matriz de comparación por pares*

Tecnología	IloT	Nube	Big Data	SFC	RA	GD	FA
IloT	1	1/3	1/5	1/7	1/5	1/7	1/3
Nube	3	1	1/3	1/5	1/3	1/5	1/2
Big Data	5	3	1	1/3	1/2	1/3	1
SFC	7	5	3	1	5	2	5
RA	5	3	2	1/5	1	1/3	1/2
GD	7	5	3	1/2	3	1	3
FA	3	2	1	1/5	2	1/3	1

Nota. Elaboración propia**2.1.6 Normalización de la matriz**

En la tabla 20 se normalizó la matriz dividiendo cada elemento entre la suma de su respectiva columna, $\hat{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}}$.

Tabla 20*Matriz normalizada*

Tecnología	IloT	Nube	Big Data	SFC	RA	GD	FA
IloT	0.032	0.017	0.019	0.055	0.017	0.033	0.029
Nube	0.097	0.052	0.032	0.078	0.028	0.046	0.044
Big Data	0.161	0.155	0.095	0.129	0.042	0.077	0.088
SFC	0.226	0.259	0.285	0.388	0.416	0.461	0.441
RA	0.161	0.155	0.190	0.078	0.083	0.077	0.044
GD	0.226	0.259	0.285	0.194	0.249	0.230	0.265
FA	0.097	0.103	0.095	0.078	0.166	0.077	0.088

Nota. Elaboración propia**2.1.7 Cálculo del vector de pesos**

Para cada fila de la matriz normalizada, se calcula el promedio de los valores. Este promedio representa el peso relativo o prioridad de cada tecnología respecto al criterio, $w_i = \frac{1}{n} \sum_j \hat{a}_{ij}$ y luego se normaliza para $\sum_i w_i = 1$

- IloT: 0.0290
- Computación en la Nube: 0.0537
- Big Data Analytics: 0.1068

- Sistemas Ciberfísicos (SFC): 0.3335
- Realidad Aumentada (RA): 0.1126
- Gemelos Digitales (GD): 0.2439
- Fabricación Aditiva (FA): 0.1006

2.1.8 Verificación de consistencia

Multiplicamos la matriz original A por el vector de pesos w: $A \times w$, donde:

- A: matriz de comparación por pares de 7×7
- w: Vector de pesos normalizados

Para calcular el valor promedio del vector de consistencia (λ_{max}), se usa la siguiente formula

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A * w)_i}{w_i}$$

Donde:

- $(A * w)_i$: es el i-ésimo elemento del vector producto.
- w_i : es el peso correspondiente a esa posición.
- $N = 7$ (cantidad de tecnologías)

Calculando se obtiene el valor de:

$$\lambda_{max} = 7.232$$

Con el valor de λ_{max} se calcula el Índice de Consistencia (CI)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0.0387$$

Considerando el Índice Aleatorio (RI) correspondiente al tamaño $n = 7$, de $RI = 1.32$, se calcula Índice de Consistencia Relativo (CR):

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.0293$$

El CR obtenido es menor de 0.1 ($CR < 0.10$), por lo tanto, se concluye que la matriz de comparación por pares es consistente, lo que significa que los juicios realizados son coherentes y válidos para la toma de decisiones.

2.1.9 Resultado final

Con base en el valor ponderado del impacto, las tecnologías se ordenan en función de su contribución a la reducción de costos:

1. **Sistemas Ciberfísicos (SFC):** 0.3535; impacto sistémico sobresaliente por autonomía y control en tiempo real. Representan la tecnología de mayor impacto sistémico dentro del mantenimiento 4.0. Su capacidad para integrar sensores, actuadores, modelos digitales y control inteligente en tiempo real permite autonomía operacional, detección temprana de fallas y optimización continua de los procesos de mantenimiento. Su implementación reduce fallas, tiempos muertos y costos de operación, consolidándolos como la base de la autonomía operativa del mantenimiento 4.0.
2. **Gemelos Digitales (GD):** 0.2439; poseen un impacto estratégico superior al permitir la optimización del ciclo de vida de los activos y del TCO (Total Cost of Ownership). Al simular y predecir fallas el comportamiento operativo de los equipos, los Gemelos Digitales facilitan la toma de decisiones anticipadas de mantenimiento y renovación, reduce fallas imprevistas, mejora la confiabilidad y extiende la vida útil de los equipos críticos, contribuyendo al incremento del ROI y la sostenibilidad operativa.
3. **Realidad Aumentada (RA):** 0.1126; presenta un impacto operativo directo e inmediato al reducir el MTTR (Mean Time To Repair), los desplazamientos del personal técnico y los errores humanos durante las tareas de mantenimiento. Mediante la superposición de información técnica en campo y la asistencia remota, la RA incrementa la productividad, estandariza procedimientos y disminuye costos asociados a paradas prolongadas. Actúa como tecnología de soporte táctico en la ejecución eficiente de las actividades de mantenimiento.
4. **Big Data Analytics:** 0.1068; constituye la base analítica del mantenimiento predictivo, permitiendo transformar los datos del IIoT en conocimiento accionable. Su impacto se centra en la predicción de fallas, análisis de tendencias y estimación de vida útil remanente (RUL), lo que reduce el mantenimiento correctivo y mejora la disponibilidad operativa. Además, contribuye a optimizar la planificación y asignación de recursos, generando ahorros sostenidos en OPEX y mejorando los indicadores de confiabilidad y desempeño (MTBF, OEE)
5. **Fabricación Aditiva (FA):** 0.1006; aporta un impacto tangible y complementario sobre la continuidad operativa, al posibilitar la producción “on-demand” de repuestos y componentes críticos. Esta capacidad reduce significativamente los tiempos de parada no programada, la dependencia de proveedores externos y

los costos logísticos asociados al almacenamiento de repuestos. La FA se consolida como una herramienta estratégica para la resiliencia operativa y la optimización del inventario de mantenimiento.

6. Computación en la Nube: 0.0537; actúa como plataforma habilitadora de integración y escalabilidad, permitiendo el almacenamiento, procesamiento y análisis centralizado de datos en entornos virtualizados. Su contribución se orienta a la reducción de CAPEX mediante la virtualización de infraestructuras locales, y a la disminución de OPEX por gestión remota y automatización de flujos de información. La Nube facilita la interoperabilidad entre sistemas CMMS, EAM, SCADA e IoT, potenciando la gestión global del mantenimiento.
7. IIoT: 0.0290; constituye la infraestructura de monitoreo y conectividad del mantenimiento 4.0, al permitir la adquisición y transmisión continua de datos de condición de los activos. Aunque su impacto económico directo es moderado, es una tecnología esencial que habilita capas analíticas superiores (Big Data, GD, SFC, etc.). Su incorporación reduce la incertidumbre operativa, mejora la trazabilidad y marca el punto de partida hacia la digitalización integral del mantenimiento.

2.2 Metodología para el cálculo del beneficio económico neto

En el contexto de Mantenimiento 4.0, para evaluar la viabilidad y el retorno de la inversión es esencial calcular con precisión los gastos de capital (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX)

2.2.1 Metodología de cálculo del CAPEX

El CAPEX representa la inversión inicial en activos fijos, infraestructura tecnológica y licencias requeridas para implementar cada tecnología de mantenimiento 4.0. La metodología de cálculo incluye los siguientes componentes:

$$\text{CAPEX} = \sum (\text{Costo de Hardware} + \text{Software} + \text{Licencias} + \text{Instalación e integración} + \text{Capacitación})$$

Los costos de adquisición dependerá de las tecnologías implementadas, por ejemplo:

- IIoT: sensores, PLCs, RTUs, actuadores, gateways, instalación en campo, etc.
- Computación en la Nube: licencias, migración de datos, configuración inicial, etc.

- Big Data Analytics: software de análisis, clúster de datos, etc.
- SFC: redes integradas, hardware embebido, microcontroladores, etc.
- Realidad Aumentada: gafas inteligentes, plataformas AR, etc.
- Gemelos Digitales: Modelado 3D, simulación, gemelo virtual, etc.
- Fabricación Aditiva (FA): impresoras 3D industriales, sistemas de posprocesado, software especializado, infraestructura eléctrica y de ventilación, capacitación inicial y adecuaciones del espacio físico.

2.2.2 Metodología de cálculo del OPEX

El OPEX comprende los costos recurrentes asociados a la operación del sistema, incluye los costos operativos recurrentes como mantenimiento, suscripciones y energía. La metodología para su cálculo considera:

OPEX = \sum (Licencias o suscripciones + costo de mantenimiento + conectividad + personal + servicios tercerizados + soporte técnico)

Los costos de OPEX dependerá de las tecnologías implementadas, por ejemplo:

- IIoT: mantenimiento de sensores, calibraciones, costos de red de datos.
- Nube: pago mensual de servicios (IaaS, PaaS, SaaS).
- Big Data: almacenamiento y procesamiento en la nube, soporte técnico.
- SFC: actualizaciones de firmware, licencias embebidas.
- RA: mantenimiento de hardware, actualizaciones de software.
- Digital Twins: actualización continua de modelos virtuales, procesamiento continuo
- Fabricación Aditiva (FA): consumo de materiales (polímeros, resinas, metales en polvo), energía eléctrica, mantenimiento de las impresoras, reemplazo de piezas críticas (boquillas, láser, filtros), mano de obra técnica, y otros.

2.2.3 Cálculo de beneficios netos (BN)

El ahorro logrado frente a los costos totales de inversión y operación se calcula considerando entre otros:

- Reducción del MTTR y del tiempo de inactividad (aumento de disponibilidad).
- Menor consumo de repuestos por mantenimiento predictivo (reducción de OPEX).
- Reducción de fallas no planificadas (reducción de costos de emergencia).

- Aumento de producción efectiva (aumento de ingresos).

Los beneficios netos (BN) se calculan de la siguiente manera:

$$\text{BN} = (\text{Ahorros en Mantenimiento} + \text{Ahorros en Producción} + \text{Incremento en Disponibilidad}) - (\text{CAPEX} + \text{OPEX})$$

2.2.4 Cálculo del retorno de la inversión (ROI)

Mide la rentabilidad de la inversión o retorno de la inversión (ROI) se calcula de la siguiente manera:

$$\text{ROI} = \frac{\text{BN}}{\text{CAPEX} + \text{OPEX}} \times 100\%$$

Interpretación:

ROI > 100%: inversión rentable.

ROI < 100%: revisar tecnologías o estrategia de implementación.

Se evaluaron siete tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 aplicadas al mantenimiento de activos físicos en entornos industriales, utilizando el método Analytic Hierarchy Process (AHP) para cuantificar su impacto relativo en la reducción de costos. Los resultados evidencian que estas tecnologías no generan aportes homogéneos, sino que generan niveles diferenciados de impacto en la reducción de costos de mantenimiento. Los Sistemas Ciberfísicos (SFC) emergen como la tecnología de mayor incidencia debido a su capacidad para integrar sensores, actuadores, procesamiento embebido y control autónomo en tiempo real, lo que permite minimizar fallas no planificadas y elevar de manera significativa la disponibilidad y estabilidad operativa de los activos. En segundo lugar, los Gemelos Digitales (GD) demuestran un impacto estratégico sustancial al optimizar el ciclo de vida del activo mediante simulaciones predictivas, evaluación de escenarios y toma de decisiones basada en datos, favoreciendo la confiabilidad y la sostenibilidad operativa.

En un nivel intermedio se sitúan la Realidad Aumentada (RA), Big Data Analytics y la Fabricación Aditiva (FA), tecnologías que aportan beneficios tácticos relevantes para la reducción del MTTR, la disponibilidad inmediata de repuestos críticos y la generación de información analítica para soporte predictivo. Aunque la Computación

en la Nube y el IIoT muestran un impacto económico directo más moderado, desempeñan un rol habilitador esencial al proporcionar infraestructura, conectividad, interoperabilidad y capacidades de adquisición continua de datos que permiten el funcionamiento integral de las tecnologías avanzadas del ecosistema 4.0.

En síntesis, los resultados confirman que las tecnologías con impacto sistémico, predictivo y autónomo principalmente SFC y GD concentran la mayor contribución a la reducción de costos de mantenimiento. Las demás tecnologías cumplen funciones complementarias que fortalecen la continuidad operativa, la eficiencia del mantenimiento y la resiliencia del sistema. Esta jerarquización constituye una base técnica sólida para orientar decisiones de inversión y priorizar estrategias de implementación en el marco del diseño de un modelo de Mantenimiento 4.0, garantizando una transición progresiva, eficiente y sustentada en datos hacia una gestión moderna, confiable y económicamente optimizada.

En el siguiente capítulo se desarrolla la metodología de diagnóstico del sistema de mantenimiento, orientada a determinar su nivel de madurez, identificar brechas tecnológicas y priorizar los activos que requieren intervención estratégica para la transición hacia el Mantenimiento 4.0. Este análisis se vincula directamente con los resultados del Capítulo II, ya que la jerarquización del impacto de las tecnologías habilitadoras permite enfocar el diagnóstico en aquellas capacidades y activos cuya mejora es más crítica para avanzar hacia un modelo de gestión digital, predictivo y optimizado.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE ÍNDICE GLOBAL DE MADUREZ Y DIAGNÓSTICO DE MADUREZ PARA LA TRANSICIÓN AL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO 4.0

El presente capítulo desarrolla la metodología utilizada para evaluar la madurez del sistema de mantenimiento de la organización, con el fin de orientar su transición hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0). Esta evaluación integra dos enfoques complementarios: el Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM) y un diagnóstico multidimensional de madurez alineado a los principios de la Industria 4.0 y lineamientos de la ISO 55001:2024, la ISO 55002:2020, la UNE-EN 15341:2020, la IEC 62443 y otros estándares. Su aplicación permite comprender el estado actual del mantenimiento y su capacidad para evolucionar hacia el SGM 4.0.

El cálculo del IGM proporciona una medición cuantitativa del nivel de desarrollo del sistema de mantenimiento a partir de cuatro factores clave: calidad de datos, calidad de información, calidad del conocimiento y calidad de la ejecución del mantenimiento. Estos componentes representan todo el ciclo de valor analítico, desde la adquisición de datos operativos hasta la obtención de resultados medibles, asegurando objetividad, trazabilidad y comparabilidad. Paralelamente, el diagnóstico de madurez del SGM 4.0 examina dimensiones estratégicas asociadas al liderazgo, la planificación, el soporte, la operación, la evaluación del desempeño y la mejora continua. Cada dimensión es evaluada mediante criterios específicos que permiten identificar brechas, capacidades existentes y oportunidades de desarrollo necesarias para migrar hacia el SGM 4.0.

3.1 Metodología para el cálculo del Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM)

El objetivo es calcular un Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM), expresado entre 0 y 100 %, a partir de cuatro factores de calidad. El resultado permite identificar el nivel de evolución del sistema de mantenimiento dentro del marco conceptual de transición tecnológica: mantenimiento 1.0 (reactivo), mantenimiento 2.0 (preventivo), mantenimiento 3.0 (basado en condición) y mantenimiento 4.0 (predictivo y prescriptivo)

3.1.1 Dimensiones e indicadores

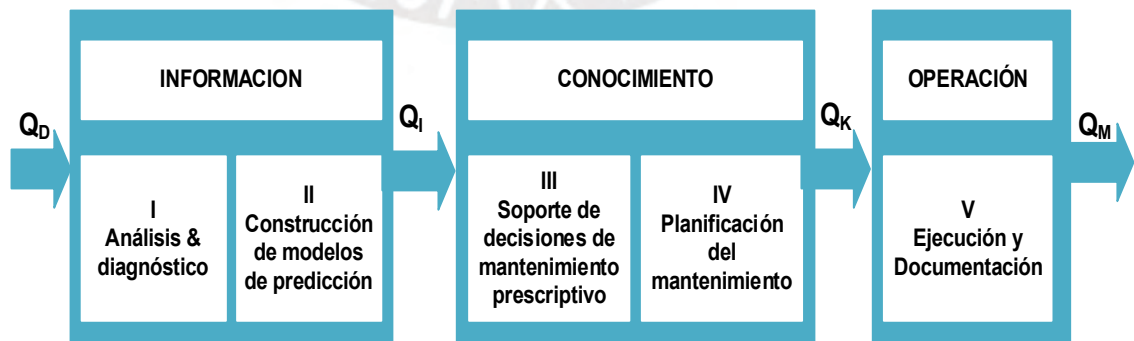
Basado en el modelo de madurez para Knowledge-Based Maintenance (KBM) propuesto por Nemeth et al. (2019), se consideran cuatro factores de calidad:

- a) **Calidad de datos (QD):** evalúa si los datos utilizados por el sistema de mantenimiento cumplen criterios de validez, precisión, completitud, oportunidad, unicidad y consistencia. Considera fuentes como sensores IIoT, registros de órdenes de trabajo, sistemas SCADA, ERP, base de datos, etc.
- b) **Calidad de la información (QI):** mide la capacidad de transformar datos en información útil para el análisis operativo. Incluye listas de fallas, tendencias, análisis descriptivos y diagnósticos, reportes estructurados y tableros de control. Representa la conversión de los datos en un insumo analítico confiable.
- c) **Calidad del conocimiento (QK):** mide qué tan bien la organización posee, actualiza y aplica el conocimiento técnico necesario para el mantenimiento, integrando el nivel de formación y experiencia, aprendizaje organizacional y la existencia de procedimientos, bases de conocimiento accesibles y estandarizadas. En conjunto, QK refleja la solidez del conocimiento disponible y su uso efectivo en la toma de decisiones de mantenimiento.
- d) **Calidad de la ejecución del mantenimiento (QM):** corresponde a los resultados obtenidos: OEE, MTBF, MTTR, cumplimiento del programa, costos y desempeño general.

En la figura 4, se presenta el diagrama general para la evaluación del IGM, donde se observa la relación entre QD, QI, QK y QM. El enfoque central consiste en cuantificar la calidad de las entradas (QD), la eficiencia del procesamiento (QI), el aprovechamiento del conocimiento (QK) y finalmente el desempeño operativo (QM), con el fin de determinar el nivel de madurez alcanzado

Figura 4

Diagrama para evaluar la madurez el Índice Global de Madurez



Nota. Adaptado de Nemeth et al. (2019)

3.1.2 Cálculo de los factores

Cada factor de calidad Q_x (Q_D , Q_I , Q_K , Q_M) se calcula a partir de un conjunto de indicadores I_i normalizados entre 0 y 1, mediante un promedio ponderado:

$$Q_x = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Q_x : calidad del componente (datos, información, conocimiento o mantenimiento).

I_i : valor del indicador i (entre 0 y 1).

w_i : peso del indicador i (suma total = 1).

n : número de indicadores usados.

a) **Calidad de datos (QD)**: se evalúa mediante seis indicadores fundamentales que describen qué tan adecuados son los datos

- **Validez (V)**: verifica si los datos cumplen con reglas sintácticas, formatos, tipos, rangos y estándares establecidos.

$$V = \frac{\text{Número de datos validos}}{\text{Número total datos validos}}$$

- **Exactitud (A)**: mide qué tan correctamente los datos representan las condiciones reales del activo, proceso o variable monitoreada.

$$A = \frac{\text{Número de datos correctos}}{\text{Número total datos validos}}$$

- **Compleitud (C)**: grado en que se han registrado todos los datos requeridos para el proceso de mantenimiento.

$$C = \frac{\text{Número de campos completos}}{\text{Número de campos requeridos}}$$

- **Oportunidad / Timeliness (T)**: mide si los datos son actualizados y capturados dentro del tiempo necesario para soportar decisiones de mantenimiento.

$$T = \frac{\text{Número de datos actualizados}}{\text{Total de datos totales}}$$

- **Unicidad (U)**: verifica que no existan duplicidades de registros dentro de una misma base de datos.

$$U = \frac{\text{Número de registros duplicados}}{\text{Total de registros totales}}$$

- **Consistencia (Co)**: evalúa si los datos mantienen coherencia entre distintos sistemas, repositorios o campos relacionados.

$$Co = \frac{\text{Número de registros consistentes}}{\text{Total de registros totales}}$$

b) Calidad de la información (QI): evalúa qué tan bien los datos se transforman en información útil, precisa, clara y oportuna para la gestión del mantenimiento.

- **Relevancia (R):** Determina si la información es pertinente para la toma de decisiones.

$$R = \frac{\text{Número de informes relevantes}}{\text{Número informes generados}}$$

- **Utilidad (Ut):** Evalúa qué proporción de la información disponible es realmente utilizada por el personal.

$$Ut = \frac{\text{Número de informes utilizados}}{\text{Número informes disponibles}}$$

- **Claridad (Cl):** Mide si la información es comprensible, inequívoca y bien comunicada.

$$Cl = \frac{\text{Número de informes claros}}{\text{Número de informes evaluados}}$$

- **Exactitud (E):** Determina si el análisis representa correctamente el estado real de los activos.

$$E = \frac{\text{Número de análisis correctos}}{\text{Total de análisis totales}}$$

- **Integralidad (Ig):** Indica si la información contiene todos los elementos necesarios (completitud de información).

$$Ig = \frac{\text{Número de elementos completos}}{\text{Número de elementos totales}}$$

- **Concisión (Cn):** Evalúa si la información evita redundancias y elementos innecesarios.

$$Cn = \frac{\text{Número de elementos redundantes}}{\text{Número de elementos totales}}$$

- **Actualidad (Ac):** Mide si la información está actualizada y no es obsoleta.

$$Ac = \frac{\text{Número de informes actualizados}}{\text{Número de informes totales}}$$

- **Corrección (Cr):** Determina si la información es verdadera, coherente y libre de sesgos.

$$Cr = \frac{\text{Número de informes correctos}}{\text{Número de informes evaluados}}$$

- **Consistencia (Co):** Verifica coherencia del contenido distintos reportes o entre sistemas (SCADA, CMMS, ERP, etc.).

$$Co = \frac{\text{Número de informes consistentes}}{\text{Total de informes evaluados}}$$

- **Oportunidad / Timeliness (T):** Mide si la información es generada y distribuida a tiempo.

$$T = \frac{\text{Número de informes entregados a tiempo}}{\text{Total de informes entregados totales}}$$

- **Trazabilidad (Tr):** Evalúa si la información tiene fuente clara, verificable y auditable

$$Tr = \frac{\text{Número de informes trazables}}{\text{Total de informes totales}}$$

- c) **Calidad del conocimiento (QK):** evalúa qué tan bien la organización adquiere, estructura, usa, mantiene y mejora el conocimiento técnico necesario para la toma de decisiones de mantenimiento

- **Estandarización del conocimiento (Es):** evalúa el grado en que los procesos, procedimientos y métodos están documentados y normalizados.

$$Es = \frac{\text{Número de procedimientos estandarizados}}{\text{Número procedimientos requeridos}}$$

- **Disponibilidad del conocimiento (Dc):** indica si el conocimiento crítico es accesible para técnicos, ingenieros y supervisores cuando lo necesitan

$$Dc = \frac{\text{Número de documentos accesibles}}{\text{Número de documentos requeridos}}$$

- **Actualización del conocimiento (Ac):** evalúa si los documentos, bases de conocimiento y procedimientos se mantienen actualizados.

$$Ac = \frac{\text{Número de documentos actualizados}}{\text{Total de documentos totales}}$$

- **Nivel de Educación (Ed):** mide el grado de calificación académica respecto a lo requerido para el puesto.

$$Ed = \frac{\text{Número de personal calificado}}{\text{Número de personal total}}$$

- **Nivel de Experiencia (Ex):** Cuantifica la experiencia técnica acumulada del equipo.

$$Ex = \frac{\text{Experiencia promedio (años)}}{\text{Experiencia requerida (años)}}$$

- **Nivel de Logro (Lg):** Evalúa el cumplimiento de metas de desempeño asociadas al mantenimiento.

$$Lg = \frac{\text{Número de metas cumplidas}}{\text{Número de metas asignadas}}$$

- **Cultura de innovación (Cu):** Mide si el área de mantenimiento es abierta al aprendizaje, ideas nuevas y mejora continua.

$$Cu = \frac{\text{Número de ideas evaluadas o adoptadas}}{\text{Total de ideas propuestas}}$$

- **Capacitación efectuada (Cp):** Mide el acceso y participación del personal en programas de formación relevantes.

$$Cp = \frac{\text{Número de empleados capacitados}}{\text{Número de empleados totales}}$$

- d) **Calidad de la ejecución del mantenimiento (QM):** mide la efectividad real del sistema de mantenimiento en términos de desempeño de los activos, eficiencia operativa, nivel de cumplimiento y control del mantenimiento correctivo.

- **OEE (Overall Equipment Effectiveness) o Eficiencia Total del Equipo:** indicador que mide qué tan eficientemente un activo productivo utiliza su tiempo para generar valor, depende de la disponibilidad (A), rendimiento (P) y calidad del producto (Q)

$$OEE = A \times P \times Q$$

- **MTBF normalizado:** indica tiempo promedio entre fallas consecutivas del equipo.

$$MTBF = \frac{\text{Horas operativas}}{\text{Nº de fallas}}$$

$$MTBF_n = \frac{\text{MTBF real}}{\text{MTBF objetivo}}$$

- **MTTR:** Tiempo promedio requerido para reparar una falla.

$$MTTR = \frac{\text{Horas de parada por reparación}}{\text{Nº de paradas}}$$

$$MTTRn = \frac{MTTR \text{ real}}{MTTR \text{ objetivo}}$$

- **Cumplimiento del Programa de Mantenimiento (PM):** Porcentaje de actividades de mantenimiento preventivo/planificado ejecutadas respecto al total programado.

$$PM = \frac{\text{Número de OT planificadas ejecutadas}}{\text{Número de OT planificadas}}$$

- **Porcentaje de Mantenimiento Correctivo (MC):** Cuantifica la experiencia técnica acumulada del equipo.

$$MC = \frac{\text{Número de OT correctivas}}{\text{Número de OT totales}}$$

- **Costo de Mantenimiento sobre el Valor de Reposición (CMVR):** Evalúa si el gasto en mantenimiento es proporcional al valor del activo.

$$CMVR = \frac{\text{Costo de mantenimiento anual}}{\text{Valor de reposición del activo}}$$

- **Tasa de Fallas Repetitivas (FR):** Evalúa las fallas que reaparecen dentro de un periodo.

$$FR = \frac{\text{Número de fallas recurrentes}}{\text{Total de fallas}}$$

- **Índice de Disponibilidad del Repuesto Crítico (DRC):** Evalúa la disponibilidad del inventario de repuestos críticos para evitar tiempos muertos.

$$DRC = \frac{\text{Número de repuestos críticos disponibles en inventario}}{\text{Número total de repuestos críticos requeridos}}$$

3.1.3 Pesos de cada dimensión (ψ)

Siguiendo el modelo KBM de Nemeth et al. (2019), se asignan pesos diferenciados a cada una de las cuatro dimensiones evaluadas. Estos valores reflejan su importancia relativa dentro del proceso de madurez del mantenimiento:

- ψ_D (peso de QD) = 0,30
- ψ_I (peso de QI) = 0,30
- ψ_K (peso de QK) = 0,30
- ψ_M (peso de QM) = 0,10

Por condición

$$\psi_D + \psi_I + \psi_K + \psi_M = 1$$

3.1.4 Cálculo del Índice Global de Madurez (IGM)

El IGM se obtiene mediante un promedio ponderado lineal de los cuatro factores de calidad evaluados:

$$IGM = Q_D \cdot \psi_D + Q_D \cdot \psi_D + Q_D \cdot \psi_K + Q_D \cdot \psi_K + Q_D \cdot \psi_M$$

El resultado final se expresa como porcentaje:

$$\%IGM = IGM \cdot 100$$

3.1.5 Definición de rangos para los niveles de mantenimiento

El Índice Global de Madurez (IGM) permite clasificar el nivel de desarrollo del sistema de mantenimiento de la organización según el valor obtenido. La tabla 21 presenta la clasificación correspondiente, donde cada intervalo representa un estadio evolutivo claramente definido: desde un mantenimiento reactivo centrado en la corrección de fallas, hasta un sistema predictivo-prescriptivo propio del mantenimiento 4.0 basado en analítica avanzada. Esta categorización facilita la identificación de brechas tecnológicas, la priorización de inversiones y la planificación de la hoja de ruta hacia niveles superiores de madurez y desempeño operacional.

Tabla 21

Clasificación del nivel de madurez del sistema de mantenimiento de la organización según el valor obtenido de IGM

Nivel	Estrategias de mantenimiento	Rango % IGM
Mantenimiento 1.0	Reactivo (Correctivo)	0 % – 25%
Mantenimiento 2.0	Preventivo	> 25 % – 50 %
Mantenimiento 3.0	Basado en la Condición (CBM)	> 50 % – 75 %
Mantenimiento 4.0	Predictivo y prescriptivo (analítica avanzada)	> 75 % – 100 %

Nota. Elaboración propia

En el Anexo A se presenta la metodología para el cálculo del Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM).

3.2 Diagnóstico de madurez para la transición al Sistema Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0)

3.2.1 Definición de dimensiones y criterios

Para el diagnóstico de madurez del sistema actual de mantenimiento se definieron siete dimensiones estratégicas, seleccionadas a partir de modelos internacionales de gestión de activos, enfoques sistémicos de mantenimiento y referentes conceptuales de Mantenimiento 4.0

Cada dimensión se evaluó mediante ocho criterios específicos, diseñados para medir con mayor precisión las capacidades actuales de la organización.

El objetivo de esta estructura es asegurar un análisis multidimensional que permita visualizar la madurez real del sistema y, sobre esa base, definir prioridades estratégicas para la adopción progresiva del Mantenimiento 4.0. A continuación, se describen las dimensiones y criterios

a) Contexto de la organización

- Diagnóstico del entorno interno y externo
- Identificación de partes interesadas
- Definición del alcance del SGM 4.0
- Mapa de procesos de SGM 4.0
- Integración del SGM 4.0 con los Procesos de Apoyo
- Integración de tecnologías habilitadoras 4.0 para la toma de decisiones
- Marco de referencia para la toma de decisiones en el SGM 4.0
- Enfoque en decisiones basadas en datos

b) Liderazgo

- Alineación del SGM 4.0 con la estrategia organizacional
- Política de mantenimiento 4.0
- Revisión estratégica y comunicación de la política del SGM 4.0
- Asignación de roles y responsabilidades
- Aseguramiento del cumplimiento legal y normativo
- Provisión de recursos para transición 4.0
- Participación de partes interesadas

- Comunicación interna y externa

c) Planificación

- Identificación de riesgos en activos 4.0
- Evaluación de oportunidades tecnológicas
- Integración con el Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA)
- Objetivos de mantenimiento basados en datos
- Planificación para alcanzar los objetivos SMART
- Horizonte de planificación multianual digital
- Integración de los Planes de Mantenimiento con la Planificación Organizacional
- Planificación de cambios tecnológicos

d) Soporte

- Asignación de recursos
- Competencia en tecnologías habilitadoras de industria 4.0
- Conciencia del sistema de mantenimiento 4.0
- Estrategia de comunicación digital
- Gestión de la información documentada
- Gestión de datos e información
- Infraestructura tecnológica de soporte
- Protección y seguridad de la información

e) Operación

- Gestión del ciclo de vida de activos
- Planificación operacional del SGM4.0
- Control operacional basado en datos
- Gestión del cambio tecnológico
- Monitoreo del desempeño operativo
- Integración de Tecnologías Habilitadoras de la Industria 4.0 en el Mantenimiento 4.0
- Gestión estratégica de servicios tercerizados
- Logística inteligente y trazabilidad de repuestos críticos

f) Evaluación del desempeño

- Medición del desempeño de activos
- Evaluación del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM4.0)
- Seguimiento de decisiones basadas en datos
- Auditorías internas del SGM 4.0
- Revisión por la Alta Dirección del SGM 4.0
- Medición del valor generado
- Benchmarking y Comparación Externa en el SGM 4.0
- Evaluación de Madurez del SGM 4.0

g) Mejora

- Mejora continua basada en datos
- Gestión sistemática de no conformidades
- Procesos predictivos para toma de decisiones
- Optimización del ciclo de vida de activos
- Capacidad de aprendizaje organizacional
- Evaluación y ajuste del SGM 4.0
- Capacidad de implementar acciones correctivas eficaces
- Aplicación de herramientas analíticas para la mejora continua

3.2.2 Evaluación y análisis de la madurez

Para evaluar la madurez en mantenimiento se usa metodología estructurada que permite diagnosticar el nivel de madurez, proponiendo cinco niveles de madurez (0, 1, 2, 3 y 4), que indican el grado de desarrollo de cada criterio evaluada a fin de diagnosticar el estado actual a fin de identificar brechas entre el estado actual y lo esperado, establecer una hoja de ruta de mejora continua y orientar hacia a la transición a mantenimiento 4.0.

En el anexo B, se observa el diagnóstico de madurez Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, considerando todas las dimensiones, criterios y la escala de madurez en 5 niveles que indica el grado de desarrollo de cada criterio

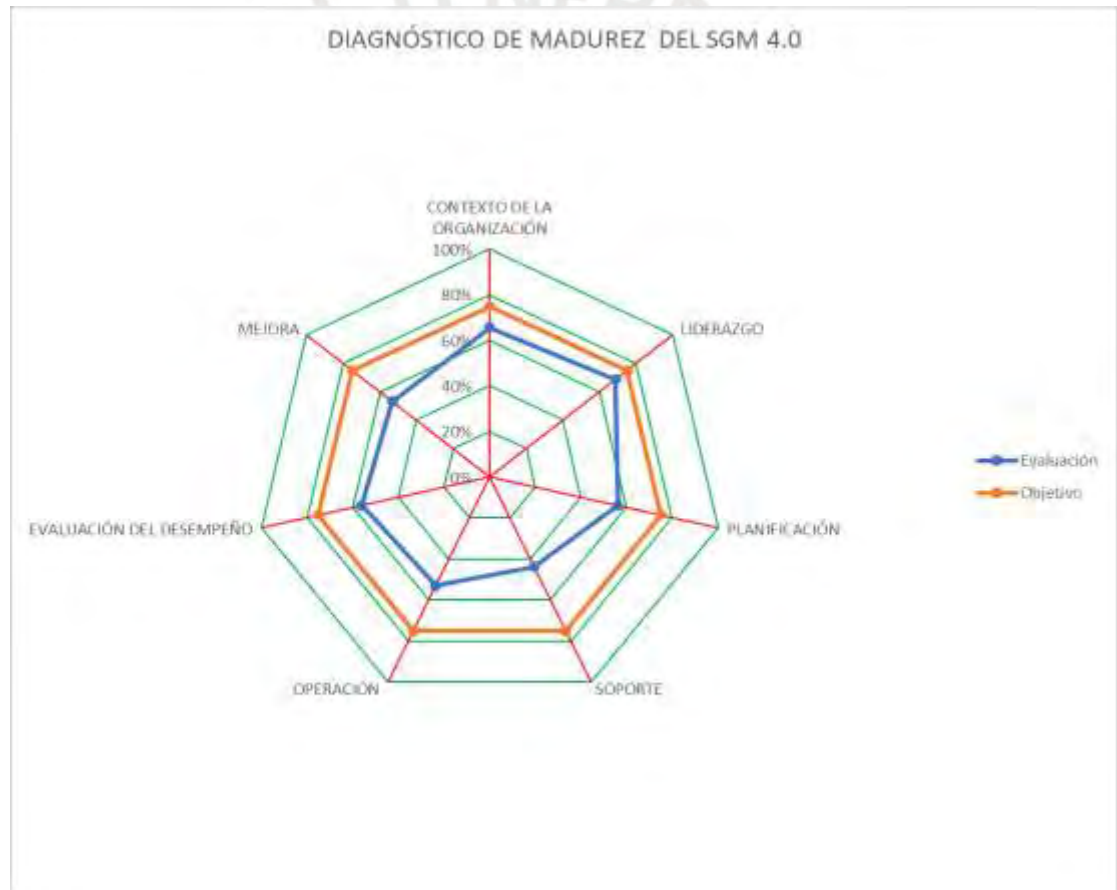
Para el análisis de resultados del diagnóstico se propone elaborar un gráfico de radial o radar para representar múltiples dimensiones cuantitativas en un mismo

plano circular, facilitando la comparación visual entre evaluaciones reales y valores de referencia o ideales.

Como ejemplo, en la Figura 5 se presenta un diagnóstico de la madurez tecnológica del sistema actual para la transición hacia el Mantenimiento 4.0. En esta figura se muestra la evaluación real de cada dimensión (línea azul) y un objetivo de referencia establecido en el 75 %. Las dimensiones en las que la línea azul se encuentra más alejada del umbral objetivo representan las mayores brechas, mientras que aquellas más cercanas al objetivo evidencian las fortalezas actuales del sistema.

Figura 5

Diagnóstico de la madurez del SGM 4.0



Nota. Elaboración propia

La aplicación del Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM) permite determinar con precisión el nivel evolutivo del sistema de mantenimiento y evaluar su grado de preparación para transitar hacia un enfoque 4.0. El valor obtenido

integra de manera ponderada los cuatro factores fundamentales del modelo: calidad de los datos, calidad de la información, calidad del conocimiento y calidad de la ejecución del mantenimiento, proporcionando una lectura cuantitativa robusta y objetiva del estado actual del sistema.

De forma complementaria, el diagnóstico multidimensional del SGM 4.0 permite identificar con claridad las áreas más críticas para la transformación tecnológica. Las dimensiones que presentaron mayor distancia respecto al nivel objetivo se convierten en ejes estratégicos de intervención, orientando las prioridades en infraestructura digital, capacidades del personal, gobernanza de datos y procesos operativos. Esta identificación de brechas constituye el insumo esencial para planificar una transición ordenada, eficiente y alineada con las mejores prácticas internacionales de Gestión de Activos.

En conjunto, ambas metodologías ofrecen una visión sistémica y coherente que convierte la madurez del mantenimiento en un parámetro medible, auditable y gestionable. Al integrar análisis cuantitativos y cualitativos, el capítulo establece los fundamentos técnicos necesarios para diseñar un sistema de mantenimiento inteligente, resiliente y capaz de sostener procesos predictivos y prescriptivos. Este enfoque permite asegurar la sostenibilidad operativa y tecnológica en el mediano y largo plazo, fortaleciendo la capacidad de la organización para competir en entornos altamente digitalizados.

En el Capítulo IV se propone una metodología de implementación del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0). El Capítulo III diagnostica el nivel de madurez del sistema de mantenimiento, identifica brechas y determina el estado actual en términos de datos, capacidades, procesos y tecnología, el Capítulo IV transforma ese diagnóstico en una hoja de ruta estructurada alineada a la ISO 55001:2024 y a las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0. De este modo, ambos capítulos se articulan de manera continua: el Capítulo III responde a “dónde estamos” y el Capítulo IV responde a “qué debemos hacer para avanzar”, garantizando que la propuesta metodológica se base en necesidades reales y acciones prioritizadas para la transición hacia un mantenimiento inteligente, digital y orientado a la toma de decisiones basada en datos.

CAPÍTULO IV

PROPUESTA METODOLÓGICA DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO 4.0 ORIENTADO A LA TOMA DE DECISIONES BASADAS EN DATOS

El capítulo presenta una propuesta de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) en plantas industriales, concebido como un marco integral que articula la gestión de activos físicos con las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 y la toma de decisiones basada en datos.

La propuesta se fundamenta en los lineamientos de la norma UNE-ISO 55001:2024 y la UNE-ISO 55002:2020, adaptándolos al contexto específico del mantenimiento 4.0 en plantas industriales. En tal sentido, el SGM 4.0 se estructura como un sistema de gestión que integra estrategia, procesos, recursos, tecnología y cultura organizacional, con el propósito de maximizar la confiabilidad, disponibilidad y desempeño de los activos durante todo su ciclo de vida. La metodología no solo aborda aspectos técnicos y operativos, sino también la gobernanza, el liderazgo y la alineación con los objetivos corporativos.

Sobre esta base, el capítulo estructura la propuesta metodológica del SGM 4.0 en torno a los componentes clave del ciclo de gestión de activos: contexto de la organización, liderazgo, planificación, soporte, operación, evaluación del desempeño y mejora. Cada uno de estos ejes se desarrolla mediante lineamientos metodológicos específicos, con énfasis en la integración de tecnologías como IIoT, Big Data, inteligencia artificial, computación en la nube, gemelos digitales, sistemas ciberfísicos (SFC) y fabricación aditiva, así como en la definición de evidencias documentadas verificables que facilitan la trazabilidad, la auditoría del sistema y procesos de certificación.

4.1 Propuesta metodológica para el análisis del contexto organizacional del SGM 4.0

El análisis del contexto organizacional constituye el punto de partida para el diseño de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) orientado a la toma de decisiones basadas en datos. Según los lineamientos de la norma UNE-ISO 55001:2024 y la UNE-ISO 55002:2020, el sistema de gestión debe fundamentarse en el conocimiento integral del entorno interno y externo, las expectativas de las partes interesadas, el alcance funcional del sistema y la identificación de los procesos que lo conforman. Para asegurar la alineación estratégica y la eficiencia operativa del SGM

4.0, esta propuesta metodológica integra prácticas internacionales de gestión de activos con tecnologías habilitadoras propias de la Industria 4.0, garantizando confiabilidad, trazabilidad analítica y toma de decisiones sustentada en evidencia técnica.

La metodología se estructura en seis ejes operativos interdependientes: (1) diagnóstico del entorno interno-externo, (2) análisis de partes interesadas, (3) delimitación del alcance físico, digital y funcional del sistema, (4) representación del mapa de procesos del SGM 4.0, (5) integración de tecnologías habilitadoras para toma de decisiones basada en datos y (6) adopción de un marco referencial para la toma de decisiones.

4.1.1 Diagnóstico del entorno interno y externo

El diagnóstico del contexto constituye el primer nivel de análisis. Su objetivo es identificar los factores que condicionan el desempeño del mantenimiento, tales como infraestructura tecnológica, cultura organizacional, entorno regulatorio, capacidades de ingeniería, disponibilidad de datos y nivel de digitalización. Para ello, se emplean herramientas estratégicas como FODA, PESTLE, benchmarking tecnológico u otros documentos estratégicos, que facilitan evaluar el estado actual y proyectar necesidades de transformación hacia un mantenimiento basado en datos.

La evidencia verificable de esta etapa incluye informes estratégicos institucionales, análisis comparativos con estándares internacionales y reportes de competitividad tecnológica. El anexo C se presenta el modelo de análisis FODA que contempla lo siguiente:

- Identificación de factores estratégicos internos (Fortalezas (F) y Debilidades (D)) y externos (Oportunidades (O) y Amenazas (A)) y construcción de la matriz FODA.
- Desarrollo de la matriz FODA de valoración cruzada para cuantificar el nivel de influencia de los factores internos (F/D) sobre los externos (O/A) y viceversa.
- Interpretación de resultados y planteamiento de acciones estratégicas para las potencialidades, limitaciones, riesgos y desafíos

4.1.2 Identificación y análisis de partes interesadas

El segundo componente metodológico corresponde a la identificación, caracterización y gestión de las partes interesadas vinculadas al Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0. Dado que la adopción del SGM 4.0 conlleva transformaciones

de carácter tecnológico, operativo y cultural, resulta necesario considerar de manera sistemática el nivel de influencia, interés y expectativas de los actores internos y externos que intervienen en el ciclo de vida de los activos físicos. Para ello, se propone la construcción de una matriz poder–interés, complementada con un registro formal de requisitos, responsabilidades, grado de impacto y criticidad institucional.

La evidencia esperada incluye matrices de stakeholders, informes o reportes de análisis partes interesadas y sus expectativas, actas de validación y planes de comunicación orientados a la adopción digital. Su propósito es asegurar una transición ordenada, minimizar resistencia al cambio y alinear la gestión de mantenimiento con los objetivos estratégicos de la organización.

El anexo D presenta el modelo metodológico utilizado para el análisis de partes interesadas, el cual contempla:

- Identificación de stakeholders o partes interesadas pertinentes para el SGM 4.0.
- Identificación de las necesidades y expectativas de las partes interesadas
- Construcción de una matriz de análisis partes interesadas donde se define el poder e interés.
- Elaboración del mapa gráfico de poder/interés
- Análisis de resultados y estrategias de gestión

4.1.3 Delimitación del alcance físico, funcional y digital del SGM 4.0

La delimitación del alcance constituye una fase crítica dentro de la propuesta metodológica del SGM 4.0, ya que establece de manera explícita los límites físicos, funcionales y digitales del sistema, así como el conjunto de activos, procesos y plataformas tecnológicas que serán considerados en su gestión. Este alcance debe considerar las instalaciones operativas, los activos críticos asociados a la continuidad productiva, las arquitecturas de automatización y control (SCADA), los sistemas de planificación y mantenimiento (CMMS, ERP), las plataformas cloud, las redes IIoT y todas las interfaces que permitan la integración y trazabilidad de la información en tiempo real.

La definición del alcance debe formalizarse en un documento aprobado por la Alta Dirección, garantizando alineamiento estratégico, asignación de recursos y claridad en las fronteras operativas del sistema. La evidencia verificable para esta etapa incluye el listado oficial de activos incluidos, distribución de responsabilidades,

diagramas de integración digital, inventario tecnológico base y cualquier documento que certifique la cobertura del SGM 4.0 dentro del ciclo de vida de los activos.

4.1.4 Mapa estructural de procesos del SGM 4.0 e integración con procesos de apoyo

El cuarto componente metodológico consiste en la representación del mapa de procesos del SGM 4.0, estructurado en tres niveles: estratégico, operativo y de soporte. Los procesos estratégicos alinean el mantenimiento con la visión corporativa y la planificación de largo plazo. Los procesos estratégicos definen la dirección organizacional y la planificación del mantenimiento alineada a objetivos del negocio. Los procesos operativos, automatizados y secuenciales, abarcan desde la adquisición de datos y diagnóstico predictivo hasta la ejecución, cierre y retroalimentación de las órdenes de trabajo de mantenimiento. Los procesos de apoyo habilitan la gestión integral mediante tecnologías digitales, innovación, talento humano, logística inteligente y contrataciones estratégicas. La evidencia verificable de este componente corresponde al mapa documentado, vigente y validado. En la figura 6 se presenta el modelo de mapa de procesos del SGM 4.0.

Figura 6

Mapa de procesos del SGM 4.0



Nota. Elaboración propia

a) Procesos estratégicos

- **Gestión estratégica organizacional:** establece las directrices y condiciones estructurales que enmarcan el funcionamiento del SGM 4.0, alineando sus objetivos con la visión corporativa, el contexto externo, los riesgos y las expectativas de las partes interesadas. Define políticas, estructuras de gobernanza, asignación de recursos y criterios de valor para los activos, integrando sostenibilidad, innovación y resiliencia. Su finalidad es posicionar al mantenimiento como un elemento estratégico.
- **Gestión estratégica del mantenimiento:** traduce los lineamientos organizacionales en planes, modelos de intervención y decisiones tácticas orientadas al ciclo de vida de los activos físicos. Establece el plan maestro de mantenimiento, prioriza activos según criticidad y oportunidad operativa, define indicadores clave (KPIs) y selecciona tecnologías habilitadoras de industria 4.0. Además, integra sistemas analíticos para la toma de decisiones basadas en datos, transformando el mantenimiento en un generador de valor y no solo en una función operativa

b) Procesos de apoyo

- **Tecnologías de la Información y Conectividad Industrial:** gestión de Infraestructura digital industrial, asegura la disponibilidad y confiabilidad de la infraestructura tecnológica. Gestión de la ciberseguridad industrial; protege los activos digitales, datos y sistemas. Integración de plataformas inteligentes; facilita la interoperabilidad entre sistemas (ERP, CMMS, SCADA, IIOT, etc.) mediante APIs, middleware y sincronización de datos en tiempo real. Gestión de datos Industriales; organiza, limpia, almacena y explota datos de operación y mantenimiento para su uso.
- **Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i):** impulsa la innovación continua del sistema de mantenimiento mediante la vigilancia tecnológica, el desarrollo de pilotos con tecnologías emergentes y la colaboración con centros de investigación o startups. Este proceso transforma ideas en soluciones aplicables, evalúa nuevas metodologías predictivas o autónomas,

y fortalece la capacidad del SGM 4.0 para evolucionar con resiliencia frente a desafíos operativos, tecnológicos o del entorno.

- **Recursos Humanos y Cultura Organizacional:** garantiza que el personal técnico cuente con las competencias digitales necesarias para operar en entornos de mantenimiento inteligentes, mediante planes de capacitación continua y promueve una cultura organizacional
- **Logística y almacenes:** asegura la disponibilidad oportuna de repuestos, herramientas y materiales críticos mediante los procesos logísticos. Este proceso permite trazabilidad completa, optimización de inventarios, logística just-in-time.
- **Compras y Contrataciones:** gestiona la adquisición de bienes y servicios técnicos mediante criterios de desempeño, digitalización y sostenibilidad. Este proceso permite incorporar proveedores tecnológicos y establecer alianzas estratégicas.
- **Gestión documental y del conocimiento:** organiza, digitaliza y preserva toda la información técnica relevante del sistema de mantenimiento (Procedimientos Operativos Estándar (SOPs), planes, informes, lecciones aprendidas) en plataformas colaborativas accesibles y seguras.

c) **Procesos operativos**

En la tabla 23 se describe las entradas y salidas de los procesos operativos que fluyen de forma secuencial e interconectada, comenzando con la adquisición de datos y supervisión del estado operativo mediante sensores IIoT y SCADA, seguida del análisis y diagnóstico predictivo basado en IA y modelos de confiabilidad. Luego se avanza hacia la planificación y programación de órdenes de trabajo, generadas de forma automatizada por el sistema (OT automatizadas), y culmina con la ejecución del mantenimiento, junto a la verificación, cierre y retroalimentación, asegurando la trazabilidad y mejora continua.

Tabla 22

Inputs y Outputs de los procesos operativos

Proceso Operativo	Entradas (Inputs)	Salidas (Outputs)
Adquisición de datos y supervisión del estado operativo	Lecturas en tiempo real (sensores IIOT, PLCs, microcontroladores, SCADA, ETC.) Inspecciones, checklists de rutina Reportes de operación Datos históricos	Datos de condición del activo Anomalías detectadas Alarmas técnicas Reportes técnicos iniciales
Análisis y diagnóstico predictivo	Datos de condición del activo Anomalías detectadas Alarmas técnicas Reportes técnicos iniciales	Probabilidad de falla Pronóstico de fallas (RUL) Diagnóstico técnico del equipo Recomendaciones técnicas Priorización de activos a intervenir OT correctivas,
Planificación de Mantenimiento	Inventario, criticidad, modos de fallo, RCM, FMEA Manuales, hojas técnicas, normas OT anteriores, RUL, MTBF, MTTR, costos, reincidencias Horas de servicio, ciclos, carga Competencias del personal, Disponibilidad de herramientas Seguridad, calidad	Plan maestro de mantenimiento Estrategias seleccionadas Banco/matriz de actividades de mantenimiento estandarizadas Matriz de criticidad y prioridades Presupuesto y estimación de recursos Indicadores planificados
Programación de Órdenes de Trabajo)	Reglas de activación del CMMS Tareas definidas en planificación Paradas programadas, producción, ventanas críticas Técnico asignado, habilidades, contratistas, turnos BOM, repuestos, lead time, stock Fallas, OT correctivas, priorización diaria ATS, LOTO, radiológico, eléctrico	Órdenes de trabajo programadas Cronograma de intervención semanal/diario Asignación de técnicos y recursos Orden de trabajo generada CMMS cargado Permisos operativos liberados
Ejecución de Mantenimiento	Órdenes de trabajo programadas Cronograma de intervención semanal/diario Asignación de técnicos y recursos Orden de trabajo generada CMMS cargado Permisos operativos liberados Procedimiento o Instructivo	Activo intervenido Evidencia de ejecución (informes, reportes, etc) Checklist Indicadores (MTTR, RUL residual, etc.)
Verificación, cierre y retroalimentación	Activo intervenido Evidencia de ejecución (informes, reportes, etc) Checklist Indicadores (MTTR, RUL residual, etc.)	Cierre de OT Registro digital Actualización de historial técnico Datos a sistema de análisis de desempeño (KPIs) Aprendizaje para mejora continua

Nota. Elaboración propia

4.1.5 Integración de tecnologías habilitadoras para toma de decisiones basada en datos

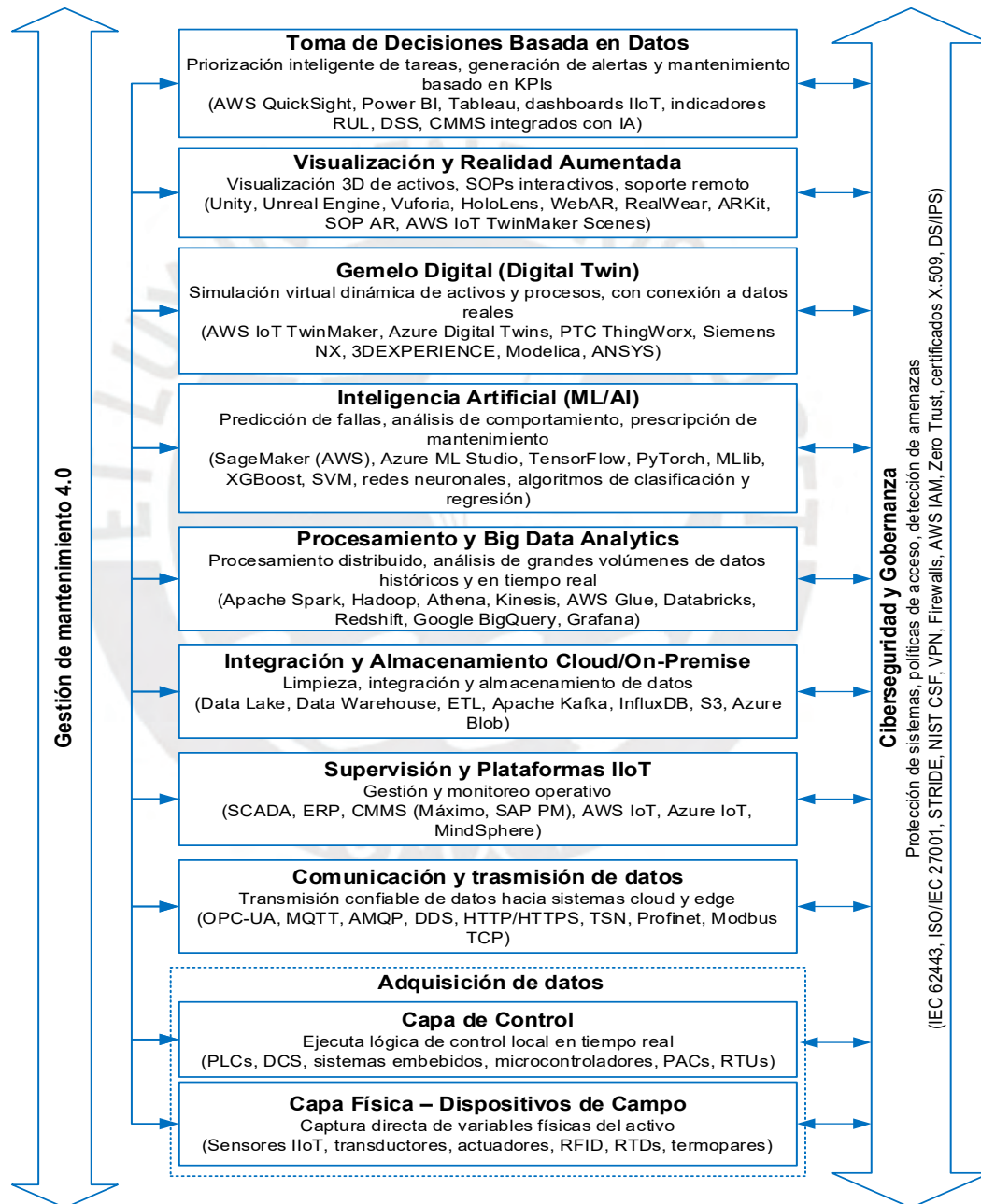
Esta fase evalúa el grado de incorporación e interoperabilidad de las tecnologías habilitadoras Industria 4.0 dentro de la arquitectura del SGM 4.0.

En la figura 7 se presenta un modelo de la arquitectura funcional del SGM 4.0 y está compuesta por un conjunto de capas tecnológicas integradas que permiten capturar, transmitir, procesar, analizar y visualizar datos en tiempo real para optimizar la toma de decisiones. Mediante la interoperabilidad entre sensores, plataformas IIoT,

almacenamiento cloud, analítica avanzada, inteligencia artificial y visualización interactiva, esta arquitectura habilita un mantenimiento predictivo, automatizado y orientado al valor. Su diseño garantiza trazabilidad, adaptabilidad y seguridad de la información en todo el ciclo de vida de los activos.

Figura 7

Arquitectura funcional del SGM 4.0 para la toma de decisiones



Nota. Elaboración propia

En el anexo E se detalla el diseño de la arquitectura funcional del SGM 4.0 para la toma de decisiones basada en datos detallando cada una de las capas tecnológicas.

4.1.6 Marco referencial para la toma de decisiones

La organización define el marco técnico que orienta la toma de decisiones en el SGM 4.0 con base en datos verificables, criterios objetivos y herramientas analíticas. Para ello se integran métodos multicriterio como AHP, AMFEC, Jack-Knife, DDC y ciclo de vida, complementados con dashboards, algoritmos predictivos (RUL) y reportes histórico-operativos.

El marco debe definir el valor esperado de los activos, los criterios de análisis y el tipo de decisión (estratégica, táctica u operativa), considerando impacto, urgencia, riesgo, costo y disponibilidad de recursos. Para su aplicación se recomienda:

- Construir una matriz multicriterio de priorización.
- Integrar IA, análisis predictivo y visualización de datos.
- Establecer umbrales automáticos de activación y niveles de respuesta.
- Garantizar fuentes de datos confiables (IIoT–SCADA–CMMS–ERP).
- Capacitar al personal en interpretación de indicadores y uso de herramientas analíticas.

En conjunto, este marco asegura decisiones oportunas, trazables y alineadas con el ciclo de vida del activo, consolidando un mantenimiento predictivo y orientado al valor.

En el anexo F se presenta la metodología de Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC)

En el anexo G se presenta la metodología de análisis de criticidad de activos con la metodología de Jack Knife y dispersión de costos

4.2 Propuesta metodológica para establecer el liderazgo en el SGM 4.0

El liderazgo constituye un elemento crítico para el diseño y consolidación de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0), en tanto la Alta Dirección es responsable de establecer el marco estratégico, cultural y de gobernanza que sustenta su funcionamiento y sostenibilidad. Según la norma ISO 55001:2024, la dirección debe asegurar la alineación del sistema con los objetivos organizacionales, definir políticas, roles, responsabilidades y mecanismos de comunicación que faciliten la adopción

tecnológica y la toma de decisiones basada en datos. En consecuencia, el liderazgo no solo habilita el marco de gobernanza del SGM 4.0, sino que también impulsa la transformación cultural hacia un modelo de mantenimiento predictivo, confiable y orientado a generación de valor.

Para consolidar este rol, se establece la necesidad de formular una política de mantenimiento 4.0 que exprese el compromiso institucional con la digitalización, la sostenibilidad operativa, el cumplimiento normativo y la mejora continua. Dicha política debe integrarse con otros sistemas de gestión existentes, fortaleciendo sinergias con producción, calidad, seguridad y gestión de activos físicos. Asimismo, el liderazgo deberá garantizar la disponibilidad de talento humano competente, infraestructura tecnológica interoperable y recursos financieros que soporten la adopción de tecnologías habilitadoras como IIoT, Cloud, Analítica Avanzada, IA, Big Data, Digital Twins, SFC y plataformas de visualización.

La metodología propuesta para consolidar el liderazgo dentro del SGM 4.0 se estructura en cinco componentes operativos, los cuales permiten evidenciar el compromiso institucional y garantizar un despliegue eficiente del sistema.

4.2.1 Alineación estratégica del SGM 4.0 con la organización

La Alta Dirección incorpora el SGM 4.0 dentro del marco estratégico corporativo, estableciendo objetivos, indicadores y prioridades vinculadas con confiabilidad del activo, continuidad operacional, costos del ciclo de vida y toma de decisiones basada en datos.

Evidencia documental asociada: Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA/PEGAF), informes estratégicos y planes corporativos actualizados.

4.2.2 Política institucional de mantenimiento 4.0

La Política del SGM 4.0, es la declaración escrita del compromiso de la Alta Dirección en la que se comunica a toda la organización que se tiene la decisión de mantener el esfuerzo para alcanzar la excelencia operativa y la gestión eficiente de los activos físicos, a través de la implementación de un SGM 4.0, alineado con la estrategia organizacional, las mejores prácticas internacionales y generación sostenible de valor a lo largo del ciclo de vida de sus activos físicos.

La evidencia verificable contempla Política del SGM 4.0 aprobada, actas de revisión, registro de comunicación interna.

En el anexo H, se presenta un modelo la política del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0

4.2.3 Definición de roles, autoridad y responsabilidades

Se estructura un organigrama funcional que establezca claramente responsabilidades, niveles de autoridad, líneas de reporte y funciones vinculadas al mantenimiento 4.0, incluyendo proveedores tecnológicos y contratistas. Esto permite asegurar coherencia en la toma de decisiones y trazabilidad de actividades. Evidencia documental asociada: Manual de Organización y Funciones (MOF), organigrama del SGM 4.0, descripciones de puesto y matriz de responsabilidades asignadas.

4.2.4 Provisión de recursos para transformación digital

La Alta Dirección garantiza la disponibilidad de recursos técnicos, financieros y humanos necesarios para habilitar el SGM 4.0, contemplando inversiones en la implementación de tecnologías habilitadoras de industria 4.0 y programas de formación para el personal.

Entre las evidencias asociada se debe verificar presupuestos aprobados, planes de adquisición tecnológica, cronogramas de implementación y registros de capacitación certificada.

4.2.5 Comunicación, revisión y participación activa de partes interesadas

Se establecen canales institucionales para reportar avances, comunicar desempeño, promover retroalimentación y se fomentan la participación de equipos operativos, técnicos y decisorios.

Entre las evidencias se debe verificar las actas de reuniones directivas, boletines técnicos, dashboards Power BI, informes ejecutivos y encuestas de participación al personal.

4.3 Propuesta metodológica para la planificación estratégica del SGM 4.0

La planificación constituye el componente estratégico que define la ruta de implementación del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) en plantas industriales. Conforme a la ISO 55001:2024, planificar implica establecer objetivos,

priorizar activos, evaluar riesgos y determinar recursos para asegurar confiabilidad, disponibilidad operativa y sostenibilidad del ciclo de vida de los activos físicos. Esta propuesta metodológica se fundamenta en un enfoque analítico y predictivo, en el que la toma de decisiones se soporta en datos en tiempo real, operacional y tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0.

La presente propuesta metodológica se organiza en componentes secuenciales e interrelacionados, el proceso parte con el análisis de riesgos y oportunidades, seguido de la formulación de objetivos estratégicos de mantenimiento, definición del Plan Estratégico de Gestión de Activos Físicos (PEGAF) e integración con la gestión organizacional. La planificación se vincula con la gestión financiera, logística, recursos humanos y sistemas digitales, asegurando que el mantenimiento 4.0 se ejecute bajo criterios medibles, trazables y auditables.

4.3.1 Identificación de riesgos y oportunidades en el SGM 4.0

La identificación de riesgos y oportunidades constituye el primer pilar metodológico de la planificación estratégica del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0). Su propósito es anticipar eventos que puedan comprometer la disponibilidad operacional, la integridad de los activos o la seguridad del sistema, así como reconocer oportunidades tecnológicas que incrementen el desempeño, la confiabilidad, eficiencia energética y el valor del ciclo de vida del activo. Este análisis debe realizarse con un enfoque preventivo, basado en información confiable; para ejecutar este componente metodológico se propone el uso combinado de herramientas de evaluación sistemática, tales como análisis de riesgos y oportunidades en el SGM 4.0, matrices de riesgo dinámicas, informes de AMFEC/FMECA, Informes de vigilancia tecnológica y benchmarking orientados a la detección de innovaciones con potencial de adopción.

En el anexo I, se presenta un modelo de análisis de riesgos y oportunidades que contempla lo siguiente:

- Identificación riesgos y oportunidades de las dimensiones clave del Mantenimiento 4.0
- Evaluación de los siguientes factores para cada riesgo u oportunidad en escala 1-10:
 - ✓ Severidad (S): Impacto potencial del riesgo u oportunidad
 - ✓ Ocurrencia (O): Probabilidad de ocurrencia del evento (escala 1-10).

- ✓ Detección (D): Capacidad de detectar o mitigar el evento con controles actuales
- Se calcula el $NPR = S \times O \times D$ (Nivel de Prioridad del Riesgo)
- Identificación de las medidas o controles existentes para mitigar el riesgo o potenciar la oportunidad y se propone acciones para reducir el riesgo (minimizar NPR)

4.3.2 Objetivos estratégicos SMART

Una vez evaluado el riesgo, la planificación requiere definir metas alcanzables, medibles y alineadas con la visión organizacional. Los objetivos SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound) deben estar asociados a indicadores cuantitativos como MTBF, MTTR, disponibilidad, RUL, OEE, costos totales del ciclo de vida (LCC), eficiencia energética, cumplimiento de mantenimiento planificado (PMP), entre otros, los cuales permiten evaluar con precisión la efectividad del sistema y la contribución del mantenimiento a la confiabilidad operacional. Como evidencia documental verificable asociada podría ser:

- Matriz de objetivos SMART con indicadores, metas, plazos y responsables
- Dashboard operativo con KPIs en CMMS/SCADA/Power BI
- Registros de revisión mensual o trimestral con análisis de desempeño.

En el anexo J, se presenta un modelo de los objetivos del sistema de gestión de mantenimiento 4.0, donde:

- Se formulan de objetivos SMART (objetivos específicos, medibles, alcanzables, relevantes y temporales)
- Se establece criterios para cada objetivo como: indicador cuantificable (KPI), meta numérica, unidad de medida, responsable asignado, plazo de cumplimiento, frecuencia de seguimiento, recursos requeridos y rangos de evaluación (bueno, regular, malo)

4.3.3 Plan Estratégico de Gestión de activos Físicos (PEGAF) integrando el SGM

4.0

El PEGAF operativiza la planificación, consolidando el diagnóstico, los riesgos, los objetivos SMART y los requerimientos tecnológicos necesarios para avanzar hacia mantenimiento predictivo y prescriptivo. El plan debe contemplar criterios de

priorización de activos (criticidad, RUL, impacto financiero y operacional), integración tecnológica y programación multianual de implementación.

En el anexo K se presenta un modelo del PEGAF integrando el SGM 4.0.

El PEGAF establece la hoja de ruta para maximizar el valor de los activos físicos alineados a los objetivos estratégicos de la organización. Al integrar el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, se incorpora una gestión digitalizada, predictiva y basada en datos, orientada al ciclo de vida del activo.

Este modelo combina los principios de la ISO 55001:2024 con tecnologías habilitadoras de la industria 4.0, garantizando trazabilidad, eficiencia operativa y resiliencia. Se estructura en torno a siete ejes: contexto de la organización, liderazgo, planificación, soporte, operación, evaluación de desempeño y mejora continua.

4.3.4 Integración de la planificación del SGM 4.0 con la gestión organizacional

Para garantizar viabilidad operativa, la planificación debe integrarse con presupuesto, logística, gestión del talento, tecnología de información, etc. Esta sincronización evita brechas entre requerimiento técnico y disponibilidad institucional, y fortalece la gobernanza del sistema. Evidencia documental verificable asociada:

- Matriz de integración entre mantenimiento, finanzas, TI, RRHH y logística.
- PEI, POI, presupuesto institucional
- Registro de recursos asignados (CAPEX/OPEX), contratos y adquisiciones tecnológicas.

4.4 Propuesta metodológica para asegurar el soporte en el SGM 4.0

El soporte constituye el sustento operativo del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) y comprende los recursos, capacidades técnicas, infraestructura digital, mecanismos de comunicación, información documentada y gestión del conocimiento que permiten la ejecución eficiente del mantenimiento basado en datos. La norma ISO 55001:2024 establece que la organización debe garantizar los recursos necesarios para la gestión de activos, desarrollar competencias acordes al entorno tecnológico, asegurar una comunicación eficaz y controlar la información documentada que soporta la toma de decisiones. Por tanto, la gestión del soporte no solo habilita el funcionamiento del

sistema, sino que determina su sostenibilidad, escalabilidad y capacidad de evolución hacia modelos predictivos y prescriptivos.

La metodología propuesta se fundamenta en un enfoque secuencial y verificable mediante evidencia documental, lo que permite evaluar el nivel de preparación institucional para operar un mantenimiento digitalizado, interoperable y orientado al ciclo de vida del activo.

4.4.1 Gestión de recursos técnicos, humanos y financieros

La Gerencia General en conjunto con las Gerencias de Gestión de Activos, Gerencia de Mantenimiento y otras gerencias pertinentes detectan las necesidades en materia de recursos, las cuales son posteriormente gestionadas por el Gerente de Finanzas u equivalente, proporcionando los recursos necesarios para implementar y mejorar los procesos del SGM 4.0. Evidencia documental verificable se tiene los planes de inversión en tecnologías 4.0, dotación de personal especializado y presupuesto asignado a mantenimiento predictivo.

4.4.2 Desarrollo de competencias

El funcionamiento del SGM 4.0 exige personal con competencias en tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0. Para ello, la organización debe implementar un sistema formal y continuo de formación, evaluación y certificación en IIoT, Big Data, IA, SCADA, Digital Twins, SFC, ciberseguridad, etc., alineado al PEGA/PEGAF. Este proceso permite cerrar brechas técnicas y asegurar que el talento humano cuente con capacidades para operar y mejorar el sistema de mantenimiento basado en datos. Se debe contar con el Procedimiento de Reclutamiento y Selección del Personal y se debe asignar personal competente a las diferentes actividades de Mantenimiento en base a su educación, formación o experiencia laboral que se encuentra en el Manual de Organización y Funciones. Con la finalidad de mantener la competencia del personal, se identifican las necesidades de capacitación de su personal, las cuales se plasman en el Plan Anual de Capacitación. Los Gerentes y jefes de Área son responsables de hacer cumplir el Plan Anual de Capacitación y mantener los registros de competencia, los que incluyen la evaluación de la eficacia de capacitación, de acuerdo al Procedimiento de Evaluación de la Capacitación del Personal. Entre las evidencias asociadas se tiene:

- Plan Anual de Capacitación

- Registro de participación y certificaciones técnicas
- Evaluación de la eficacia de capacitación
- Manual de Organización y Funciones

4.4.3 Generación de conciencia operativa

Se implementan programas de sensibilización para asegurar que el personal comprenda la importancia del mantenimiento 4.0 y su impacto en confiabilidad, disponibilidad, continuidad operacional y del valor que aporta. Entre las evidencias documental asociada se tiene:

- Procedimiento y registros de inducción de personal
- Comunicados internos, charlas y presentaciones

4.4.4 Estrategia de comunicación interna y externa

La comunicación constituye un componente esencial para asegurar la comprensión, participación y alineamiento organizacional en el SGM 4.0. Para ello, se establece una estrategia que integra canales digitales y presenciales, permitiendo el flujo bidireccional de información, la difusión de resultados e indicadores, y el soporte a la toma de decisiones basada en datos. Entre las evidencias asociada verificable se tiene:

- Evidencia verificable asociada:
- Paneles visibles y tableros digitales.
- Dashboards conectados a CMMS/SCADA/Power BI.
- Apps móviles, intranet y canales corporativos.
- Registros formales de difusión institucional.

4.4.5 Gestión de información documentada

Se establece el Procedimiento para el Control de Documentos y Registros, para controlar la información documentada. El control de documentos también debe incluir el control de los documentos de procedencia externa. Así mismo, se debe controlar todos los registros correspondientes de las actividades de mantenimiento, con la finalidad de demostrar su cumplimiento en las auditorias correspondientes. Se implementa repositorios seguros de información documentada (manuales, reportes, protocolos, evidencia técnica) y se debe establecer políticas de acceso, versiones y respaldo de la información. Evidencia verificable asociado:

- Procedimiento para el Control de Documentos y Registros
- Repositorio documental con control de versiones

4.4.6 Gestión de datos e infraestructura analítica

Los datos generados por SCADA, IIoT, CMMS y plataformas cloud deben ser recopilados, validados y almacenados de forma trazable. La calidad del dato se convierte en insumo crítico para modelos analíticos y predictivos. Evidencia verificable asociado:

- Políticas y procedimientos de gestión de datos
- Base de datos técnica estructurada (RUL, MTBF, OEE)
- Reportes analíticos y modelos predictivos

4.4.7 Infraestructura tecnológica de soporte y ciberseguridad industrial

Se evalúa y asegura que la infraestructura tecnológica sea interoperable, escalable y segura. El ecosistema debe incluir redes IIoT, edge computing, servidores redundantes y plataformas cloud con respaldo automático. Entre las evidencias verificable se tiene:

- Arquitectura tecnológica y topología de red
- Certificados de ciberseguridad y control de accesos
- Log de respaldos automáticos e integridad del sistema

4.5 Propuesta metodológica para la operación del SGM 4.0

La fase de operación constituye el eje funcional del SGM 4.0, dado que permite ejecutar, monitorear y controlar las actividades de mantenimiento durante el ciclo de vida del activo con soporte en datos, analítica avanzada e interoperabilidad tecnológica. Para garantizar su ejecución efectiva, la organización debe disponer de procesos, mecanismos de control basados en información en tiempo real y criterios de decisión sustentados en desempeño, riesgo y valor generado por los activos. Esta propuesta metodológica operacional se alinea con los principios de la norma ISO 55001:2024, integrando tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 que optimizan disponibilidad, confiabilidad y continuidad operativa.

4.5.1 Gestión del ciclo de vida del activo

La organización debe gestionar integralmente todas las etapas del ciclo de vida del activo: adquisición, instalación, puesta en servicio, operación, mantenimiento, renovación y disposición; considerando análisis técnico-económico, confiabilidad esperada y vida remanente (RUL). El enfoque debe ser predictivo y orientado a decisiones basadas en datos, permitiendo evaluar el momento óptimo de intervención o reemplazo. Entre la evidencia documental vinculada se tiene:

- Procedimientos para gestión del ciclo de vida completo
- Análisis de Ciclo de Vida del Activo (LCC/LCCA)
- Matriz operacional de ciclo de vida y ruta de renovación

4.5.2 Planificación y control operacional

La planificación y el control operacional constituyen la columna vertebral del SGM 4.0, garantizando que la ejecución del mantenimiento se sustente en datos, criticidad del activo y valor generado. Bajo este enfoque, la organización debe apoyar su operación en plataformas integradas CMMS/EAMS, conectadas a SCADA, IIoT y servicios cloud, permitiendo que las órdenes de trabajo, alertas y priorizaciones se generen considerando el estado real del activo, análisis predictivo y modelos RUL. El control operacional debe ser trazable, auditable y evaluable mediante indicadores clave como OEE, MTBF, MTTR, backlog, RUL y cumplimiento del plan.

El proceso se estructura en dos niveles: planeamiento y programación. El planeamiento define las actividades a ejecutar, los recursos requeridos y los criterios técnicos basados en inventario, modos de falla (RCM/FMEA), historial de OT, manuales técnicos y requisitos de seguridad. Su producto principal es el Plan Maestro de Mantenimiento 4.0, complementado con la matriz de criticidad, la selección estratégica PdM/CBM y la estimación de recursos y presupuesto.

La programación organiza la ejecución en ventanas operativas, asignación de personal, disponibilidad de herramientas y repuestos críticos, generando cronogramas digitales con órdenes de trabajo trazables y priorizadas mediante reglas automáticas del CMMS. Como resultado se obtiene un programa operativo inteligente que libera OT, coordina permisos, asigna cuadrillas y registra el avance del mantenimiento en tiempo real.

Ambos procesos funcionan de forma integrada mediante sistemas interoperables SCADA–IIoT–CMMS, que permiten monitoreo continuo del activo, activación automática de mantenimiento por condición, visualización de KPI en dashboards y generación de evidencia verificable para auditorías y mejora continua. Los documentos que sustentan la planificación y control operacional del SGM 4.0 incluyen, entre otros:

- Plan maestro de mantenimiento 4.0
- Plan de gestión del ciclo de vida de activos físicos y digitales.
- Procedimiento de planificación y programación de mantenimiento
- Procedimiento para Integración sistemas interoperables de (SCADA, CMMS, ERP, plataformas cloud, sistemas de IA, etc.)
- Plan de Mantenimiento Predictivo (PdM)
- Plan de inspecciones técnicas basadas en condición
- Plan de mantenimiento preventivo
- Programa de Mantenimiento Predictivo (PdM)
- Procedimiento de ejecución de ordenes de trabajo de mantenimiento
- Procedimiento de mantenimiento basadas en condición
- Programa de mantenimiento preventivo
- Procedimiento de ejecución de ordenes de trabajo de mantenimiento
- Instructivo de instalación y calibración de sensores
- Instructivo para la adquisición y transmisión automático de Datos
- Instructivo de configuración y operación del CMMS
- Instructivo de tareas con realidad aumentada
- Instructivo de tareas con Digital Twins
- Procedimiento para la definición, cálculo y revisión de KPIs
- Procedimiento para identificar, analizar, evaluar y gestión de riesgos
- Manual de ciberseguridad industrial
- Guía para Integración sistemas interoperables de (SCADA, CMMS, ERP, plataformas cloud, sistemas de IA, etc.)
- Guía para Entrenamiento de Modelos de IA/ML
- Registro de Datos de Condición de Activos Físicos
- Registro de Modelos Predictivos Activos
- Registro de Alertas Inteligentes

- Registro de Órdenes de Trabajo
- Registro de KPIs del Mantenimiento 4.0
- Registro de Gemelos Digitales Operativos
- Registro de Cambios Tecnológicos
- Registro de Fallas Detectadas por IA
- Registro de Uso de Realidad Aumentada
- Registro de Análisis y Decisiones Basadas en Datos

4.5.3 Control del cambio

La organización debe definir el proceso para gestionar cambios planificados en el sistema de mantenimiento 4.0, asegurando su evaluación, control y documentación, con el fin de minimizar impactos no deseados y maximizar el valor durante el ciclo de vida del activo. El proceso de gestión del cambio contempla la solicitud formal del cambio, seguida por una evaluación que analiza riesgos, impactos y costos. Una vez aprobado por el comité técnico, se procede con una implementación controlada y documentada. Posteriormente, se realiza el seguimiento y revisión de efectos, aplicando acciones de mitigación en caso de consecuencias no deseadas, y dejando constancia en el registro histórico del sistema. El control de cambios se debe documentar en el Procedimiento integral de control de cambios, informes de evaluación de impacto técnico-económico u otro documento similar.

4.5.4 Logística, compras y almacén

La gestión logística en un SGM 4.0 constituye un componente operativo esencial, ya que la disponibilidad oportuna de repuestos es determinante para evitar fallas no programadas, reducir tiempos de indisponibilidad y sostener el desempeño del activo. La organización debe gestionar inventarios críticos mediante trazabilidad automática, monitoreo continuo de stock y pronósticos basados en consumo histórico, RUL y cargas operativas. Para ello, el sistema logístico debe integrarse al CMMS/EAM–SCADA–IIoT, habilitando reposición automática, alertas inteligentes y análisis de vida útil de componentes.

Los responsables de las unidades de Logística, Compras y Almacén deben asegurar abastecimiento eficiente mediante procedimientos estandarizados, uso de códigos únicos, lectura digital, clasificación y políticas de inventario mínimo–máximo. La evidencia documental verificable incluye:

- Procedimiento de Gestión Logística, Compras y Almacenes
- Ficha de Caracterización de Proceso - Compras
- Registro de Repuestos Críticos
- Registros de trazabilidad digital, alertas automáticas de stock, así como de consumo, rotación y reposición.
- Procedimiento de y registros que incluya criterios de selección, evaluación y seguimiento de proveedores

4.5.5 Gestión estratégica de servicios tercerizados

La organización define, controla y evalúa los servicios tercerizados vinculados al mantenimiento 4.0 considerando criticidad, desempeño y valor estratégico

La organización debe evaluar qué procesos conviene tercerizar (según criticidad, competencia y valor estratégico) definiendo su alcance, límites e interfaces con los sistemas internos

Se deben establecer contratos definiendo responsabilidades claras para gestionar estos elementos externos y asegurar la interoperabilidad de datos, la protección de la información y la trazabilidad. Además, es esencial formalizar el intercambio de conocimiento entre la organización y los proveedores mediante acuerdos técnicos y mecanismos de comunicación estandarizados. Todo servicio externo debe cumplir con los requisitos normativos y operativos, ser monitoreado regularmente y evaluado por su impacto en el rendimiento, riesgos y valor del activo. Entre las evidencias documental verificable asociada se tiene:

- Procedimiento de Compras, Evaluación y Selección de Proveedores
- Lista oficial de proveedores homologados
- Plantilla y contrato marco para Bienes y Servicios 4.0
- Registro de evaluaciones de desempeño y cumplimiento de SLA

4.6 Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño del SGM 4.0

La evaluación del desempeño constituye un componente esencial dentro de la propuesta metodológica del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0), ya que permite verificar de manera sistemática la eficacia del sistema, su contribución al valor generado por los activos físicos y su alineación con los objetivos estratégicos de la organización. Desde el enfoque de ISO 55001:2024, esta fase permite asegurar que

el sistema opera bajo condiciones controladas, que las decisiones basadas en datos generan mejoras reales sobre disponibilidad, confiabilidad y costos, y que la organización mantiene un proceso sistemático de medición, auditoría, revisión y mejora continua. La evaluación se sustenta en la medición de indicadores clave de desempeño (KPIs), el análisis de tendencias y desviaciones, auditorías internas de cumplimiento y revisión periódica por la Alta Dirección, permitiendo retroalimentar al sistema y fortalecer su madurez digital.

4.6.1 Seguimiento, medición, análisis y evaluación

El seguimiento y medición del desempeño constituye el mecanismo central para asegurar que el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) opere bajo criterios de valor, confiabilidad y toma de decisiones basadas en datos. Este proceso implica la adquisición continua de información operacional en tiempo real, el análisis comparativo respecto a objetivos estratégicos y la evaluación de tendencias que permitan anticipar fallas, optimizar recursos y ajustar planes de mantenimiento. Para ello, se integra evidencia proveniente de plataformas digitales interoperables como CMMS, SCADA, IIoT, bases de datos cloud, dashboards analíticos y modelos predictivos basados en IA/ML.

- Se determinan los parámetros que influyen directamente en la condición operativa del activo, su función productiva y su costo de ciclo de vida. Entre ellos destacan: disponibilidad, confiabilidad, MTBF, MTTR, RUL, OEE, backlog, costos OPEX/CAPEX, riesgo operativo y cumplimiento normativo.
- Definición de indicadores (KPIs) SMART; cada objetivo del SGM 4.0 se vincula con métricas específicas, medibles y trazables. Se incorporan indicadores cuantitativos (MTBF, MTTR, disponibilidad, TCO, OEE, backlog) y cualitativos
- ligados a objetivos del sistema, combinando métricas cuantitativas (MTBF, MTTR, backlog, OEE, RUL, TCO) y cualitativas (satisfacción del usuario).
- Se configuran flujos automáticos de adquisición, almacenamiento y visualización de datos mediante la integración CMMS–SCADA–IIoT–Cloud–Power BI–IA. La interoperabilidad asegura trazabilidad de eventos, generación de alertas y disponibilidad de dashboards para consulta técnica y gerencial.
- Evaluación analítica y toma de decisiones: los indicadores registrados se comparan con metas establecidas, se analizan desviaciones y tendencias, se identifican brechas de desempeño y se evalúa el impacto de decisiones

tomadas. Esta fase determina el aporte del mantenimiento al valor del activo y la consecución de los objetivos estratégicos definidos en el PEGA/PEGAF.

Entre la evidencia documental verificable asociada se tiene:

- Procedimiento de seguimiento y evaluación del desempeño
- Tablero de objetivos SMART del SGM 4.0
- Dashboard Power BI / CMMS con indicadores críticos
- Informes mensuales/trimestrales de evaluación del sistema

4.6.2 Auditoría interna del SGM 4.0

Las auditorías internas validan el cumplimiento de requisitos normativos y la eficacia del sistema. Deben ejecutarse con periodicidad planificada y en alcance progresivo, priorizando procesos de alto impacto operacional. La auditoría analiza conformidad normativa, madurez, trazabilidad de datos, gestión de riesgos, etc. Todo hallazgo debe generar acciones correctivas, plazos de cierre y verificación de eficacia.

Todas las áreas y/o procesos que integran el SGM 4.0 son evaluadas a intervalos planificados para determinar si es conforme con los requisitos de la norma ISO 55001:2024 y los requisitos establecidos por la organización. Con este propósito se implementa el Procedimiento de Auditorías Internas, documento que define las responsabilidades y requisitos para la planificación de las auditorías internas, los criterios de selección de los auditores internos, su realización y presentación de resultados, así como el manejo de los registros correspondientes.

Los criterios de la auditoría y el alcance de la misma se definen en el Plan de Auditoría y en el informe de auditoría que elaboran los auditores.

Se planifica las auditorías internas considerando el estado y la importancia de los procesos y áreas a auditar, así como resultados de auditorías previas. La frecuencia de evaluación se establece en el Programa Anual de Auditoría, el cual puede complementarse con auditorías extraordinarias autorizadas por el Gerente General. Todos los requisitos del SGM 4.0 deben ser auditados por lo menos una vez al año. La Jefatura o Gerencia que este siendo auditada debe asegurar la implementación de acciones sin demora injustificada para eliminar las no conformidades y sus causas que pudieran encontrarse durante la auditoría.

Ejecución y evidencia digital: realizar auditorías presenciales, remotas o mixtas, registrando evidencias mediante plataformas documentadas y trazables.

- Procedimiento de Auditorías Internas
- Programa anual de auditorías del SGM 4.0
- Informes de auditoría y planes de acción correctiva
- Registros de seguimiento de cierre de hallazgos

4.6.3 Revisión por la Alta Dirección

La revisión por la dirección constituye el mecanismo estratégico que determina la pertinencia, eficacia y suficiencia del SGM 4.0. Este proceso se desarrolla mediante sesiones formales, al menos una vez al año, en las cuales se evalúan informes de desempeño, hallazgos de auditoría, resultados obtenidos, desviaciones relevantes, demanda de recursos, futura, riesgos emergentes y oportunidades de mejora. Producto de ello, la Alta Dirección aprueba acciones de optimización, asignación presupuestal, inversión actualización de objetivos y ajustes metodológicos. La revisión por alta dirección debe ser periódico SGM 4.0, utilizando informes de desempeño, hallazgos de auditoría, desviaciones, cumplimiento de objetivos, riesgos y oportunidades emergentes. La toma de decisiones y asignación de recursos está enfocado a aprobar ajustes a objetivos, asignación de presupuesto, nuevas herramientas, formación técnica, o rediseño de procesos digitales. Se mantiene la Información documentada asociada como:

- Procedimiento de revisión por la dirección
- Informe de revisión por la dirección
- Actas de reunión ejecutiva y acuerdos aprobados
- Dashboard de seguimiento de compromisos y ejecución

4.6.4 Medición del valor generado

El desempeño del SGM 4.0 debe traducirse en valor económico, operacional y estratégico. La evaluación incluye cálculo de OPEX, CAPEX evitado, impacto sobre disponibilidad, reducción de fallas, optimización del ciclo de vida y retorno de inversión (ROI) asociado a iniciativas 4.0. El análisis se sustenta en metodologías financieras y en simulación predictiva para justificar inversión tecnológica futura. Entre las evidencias verificable se tiene:

- Reportes de TCO, ROI, costo evitado y reducción de OPEX
- Evaluaciones del impacto sobre disponibilidad y confiabilidad
- Reportes comparativos antes/después de la transformación 4.0

4.6.5 Benchmarking competitivo

La evaluación incluye comparación del desempeño frente a referentes del sector, para identificar brechas y definir una hoja de ruta evolutiva. Se recomienda aplicar modelos de madurez, análisis comparativo de KPIs sectoriales, aprendizaje cruzado y adopción de mejores prácticas globales.

- Informes de benchmarking nacional/internacional
- Matriz de madurez del SGM 4.0 y brechas identificadas
- Planes de mejora derivados del análisis
- Cronograma de implementación para cierre de brechas

4.7 Propuesta metodológica para la mejora del SGM 4.0

La mejora del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) constituye un proceso permanente, estructurado y estratégico cuyo propósito es asegurar la adaptación continua del sistema frente a cambios tecnológicos, variabilidad operacional y expectativas de desempeño organizacional. Conforme establece ISO 55001:2024, la mejora debe orientarse hacia la eficacia, eficiencia y pertinencia del sistema, utilizando datos reales del comportamiento y confiabilidad de los activos para optimizar decisiones a lo largo del ciclo de vida. Bajo este enfoque, la mejora no se limita a corregir desviaciones, sino que incorpora innovación incremental y transformacional mediante analítica avanzada, retroalimentación operativa, evaluación de madurez y aprendizaje organizacional continuo.

La presente propuesta metodológica integra componentes como mejora continua, gestión de no conformidades y acción predictiva basada en analítica avanzada, los cuales actúan de manera complementaria para garantizar que el SGM 4.0 evolucione y mantenga coherencia con los objetivos estratégicos, el PEGA y el desempeño esperado de los activos.

4.7.1 Mejora continua

La mejora continua constituye el mecanismo primario de optimización del SGM 4.0, articulado bajo el ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act) y soportado digitalmente por CMMS/EAMS, Power BI, IIoT y KPIs. El proceso metodológico propuesto incluye:

- Planificación de iniciativas de mejora orientadas a KPIs críticos (MTBF, MTTR, disponibilidad, OEE, RUL, TCO).

- Implementación controlada de cambios (pilotos PdM, ajustes en frecuencia CBM, incorporación de nuevos sensores, automatización de OT).
- Verificación de resultados, mediante comparación de indicadores antes, después, análisis de tendencia, desviaciones y eficiencia alcanzada.
- Estandarización y escalamiento de mejoras exitosas y actualización de procedimientos, instructivos o políticas.

Evidencia documental verificable asociada:

- Procedimiento de mejora continua del SGM 4.0.
- Registro de iniciativas de innovación I+D+i.
- Reportes de evaluación de mejoras implementadas.

4.7.2 Gestión sistemática de no conformidades y acción correctiva

El sistema requiere la detección, análisis y eliminación de desviaciones mediante un proceso estructurado de gestión de no conformidades. El enfoque considera evaluación de incidentes operativos, fallas recurrentes o incumplimiento de requisitos normativos mediante metodologías analíticas basadas en causa raíz (RCA), Ishikawa, FMEA, Árbol de Fallas o TRIPOD Beta. El procedimiento contempla:

- Identificación y registro de desviaciones.
- Análisis global del evento (factor técnico, humano, sistémico y contextual).
- Definición e implementación de acciones correctivas orientadas a causa raíz.
- Verificación post-cierre, asegurando que la recurrencia sea eliminada y el desempeño mejorado.

Evidencia documental verificable asociada:

- Procedimiento de acciones correctivas.
- Registro de no conformidades y seguimiento
- Reportes RCA e informes de verificación de eficacia.
- Actualización de procedimientos, instructivos y parámetros PdM/CBM.

4.7.3 Acción predictiva para mejora anticipada del sistema

La acción predictiva constituye el nivel más avanzado de mejora en un SGM 4.0, donde las decisiones se anticipan mediante analítica avanzada, modelos de degradación, estimación de vida útil remanente (RUL) y reconocimiento de patrones con algoritmos IA/ML. Este enfoque permite actuar antes de que la falla ocurra,

optimizar costos CAPEX/OPEX, extender la vida útil de los activos y reducir brechas operativas. La metodología considera:

- Adquisición de datos de condición mediante IIoT–SCADA–CMMS.
- Entrenamiento de modelos predictivos y dashboards de pronóstico.
- Identificación de ventanas óptimas de intervención técnica.
- Ejecución y seguimiento de recomendaciones generadas por IA/ML.

Evidencia documental verificable asociada:

- Registros de modelos predictivos operativos.
- Reportes técnicos RUL y análisis de degradación.
- Dashboards predictivos y alertas inteligentes.
- Informes de reducción de fallas/MTTR/impacto económico tras intervención.

El Capítulo IV constituye el eje articulador de la tesis al transformar el marco conceptual y los resultados del diagnóstico en una propuesta metodológica estructurada para el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0). A diferencia de los capítulos anteriores, orientados al análisis teórico de las tecnologías de la Industria 4.0 y a la evaluación del nivel de madurez del mantenimiento, este capítulo adopta un enfoque prescriptivo, definiendo de manera coherente fases, procesos y evidencias documentadas que proporcionan una guía aplicable para la gestión del mantenimiento basada en datos en el contexto organizacional. En primer lugar, la sección referida al contexto de la organización garantiza que el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) no se conciba como una iniciativa aislada, sino como una respuesta coherente y alineada con el entorno interno y externo, las necesidades y expectativas de las partes interesadas y el alcance del sistema de gestión de activos. El uso de herramientas como FODA, análisis de interesados, delimitación del alcance físico, funcional y digital, mapa de procesos y arquitectura funcional basada en datos permite construir una base sólida sobre la cual se sustenta la transformación hacia el mantenimiento 4.0. Esta aproximación favorece la coherencia entre estrategia, procesos y tecnologías. En segundo lugar, la propuesta metodológica de liderazgo, enfatiza el rol de la Alta Dirección en la consolidación del SGM 4.0, destacando la necesidad de una política institucional de mantenimiento 4.0, la definición clara de roles y responsabilidades, la provisión de recursos y la articulación de mecanismos de comunicación interna y externa. Este enfoque reconoce que la transformación digital del mantenimiento no es únicamente un desafío tecnológico, sino también cultural y organizacional, en el que el liderazgo resulta determinante para garantizar continuidad, legitimidad y compromiso transversal.

La sección de planificación, introduce un enfoque estructurado para gestionar riesgos y oportunidades, formular objetivos estratégicos SMART e integrar el SGM 4.0 dentro del Plan Estratégico de Gestión de Activos Físicos (PEGAF). Al incorporar herramientas como análisis de riesgos, objetivos basados en KPIs y planes de implementación multianuales, el capítulo establece un vínculo explícito entre la visión de largo plazo, la priorización de activos críticos y la adopción de tecnologías habilitadoras. De este modo, la planificación actúa como un mecanismo de traducción entre el diagnóstico y la ejecución operativa.

A continuación, los apartados de soporte y operación profundizan en la dimensión operativa del SGM 4.0. El soporte se orienta a garantizar recursos, competencias, comunicación, información documentada e infraestructura tecnológica y de ciberseguridad, mientras que la operación aborda la gestión del ciclo de vida del activo, la planificación y control operacional, el control de cambios, la logística inteligente y la gestión de servicios tercerizados. La inclusión de procedimientos, registros y sistemas interoperables (SCADA, CMMS, ERP, plataformas cloud, IA/ML) evidencia una concepción sistémica en la que cada proceso del mantenimiento se soporta en datos, analítica avanzada y trazabilidad digital.

La evaluación del desempeño y la mejora del sistema completan el ciclo de gestión, consolidando el carácter dinámico y evolutivo del SGM 4.0. A través del seguimiento de KPIs, auditorías internas, revisión por la Alta Dirección, medición del valor generado, benchmarking competitivo, mejora continua, gestión de no conformidades y acción predictiva, el capítulo define un circuito de retroalimentación que permite ajustar el sistema en función de resultados reales. La incorporación de modelos predictivos, estimación de RUL y analítica avanzada refuerza la orientación del SGM 4.0 hacia decisiones anticipadas, reducción de riesgos y optimización de costos a lo largo del ciclo de vida del activo.

CAPÍTULO V

DESARROLLO DE UNA ARQUITECTURA PARA LA MONITORIZACIÓN DE CONDICIÓN Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO ALINEADA CON LOS PRINCIPIOS DEL MANTENIMIENTO 4.0: CASO PRÁCTICO

Este capítulo presenta el desarrollo de una arquitectura de monitorización de condición y mantenimiento predictivo aplicada a sistemas críticos de una planta de producción de radiofármacos, específicamente a las celdas calientes y al sistema HVAC de salas limpias. La propuesta responde a la necesidad de superar las limitaciones de métodos tradicionales como el MTBF y el MTTF, mediante un enfoque alineado a los principios del Mantenimiento 4.0 y la toma de decisiones basada en datos.

Se describe un caso práctico aplicado a la producción de I-131, donde se integran sensores IIoT, plataformas cloud, sistemas SCADA y algoritmos de inteligencia artificial para analizar en tiempo real variables como presión, temperatura, vibración, partículas, tasa de dosis, etc. El análisis predictivo desarrollado constituye una prueba de concepto que demuestra la viabilidad técnica y operativa de un sistema de mantenimiento inteligente en un entorno regulado por normas GMP, ISO 14644 e IAEA, donde la trazabilidad y la robustez del control ambiental son fundamentales.

5.1 Descripción del caso de estudio

En una Planta Industrial de Producción de Radioisótopos y Radiofármacos se cuenta con líneas de producción que integra procesos nucleares, físico-químicos, farmacéuticos y otros para producir compuestos radiactivos destinados a la medicina nuclear o de uso en sector industrial.

Entre las líneas de producción de radiofármacos líquidos estériles se tiene al Pertecnetato de Sodio Tc-99m, Dolosam (Sm-153), etc. Entre las líneas de radiofarmacos líquidos no estériles al Ioduro de Sodio I-131. Entre las líneas de radiofármacos solidos no estériles a las pastillas de Ioduro de Sodio I-131. Entre las líneas de radiofármacos solidos estériles se tiene a los Componentes de Radiofármacos como AMD, DMSA, GDPA, RENTEC, MIOTEC y otros. En la figura 8 se observa celdas calientes de una línea de producción del radiofármaco ioduro de sodio (I-131).

Las líneas de producción de radiofármaco deben cumplir con las normas de las Buenas Prácticas de Manufactura (GMP), Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL), farmacopeas (USP/EP), normas del International Atomic Energy Agency (IAEA) y otros.

Para cumplir con los requisitos de la BPM para productos farmacéuticos se considera tres principales criterios en el diseño para asegurar una instalación de fabricación farmacéutica segura y productiva: protección del producto, protección del personal y protección del medio ambiente, a fin de cumplir los requisitos mínimos del ciclo de manufactura de un producto farmacéutico basado en el riesgo sanitario. También se debe cumplir con el objetivo fundamental de la seguridad radiológica que es proteger a las personas y el medio ambiente de los efectos perjudiciales de la radiación ionizante

Figura 8

Línea de producción del radiofármaco I-131



Nota. Elaboración propia

Para la manipulación segura de materiales radiactivos de alta actividad, garantizando la protección del operador, el ambiente y el producto se cuenta con celdas calientes instalados en salas limpias que cuentan con el sistema HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning).

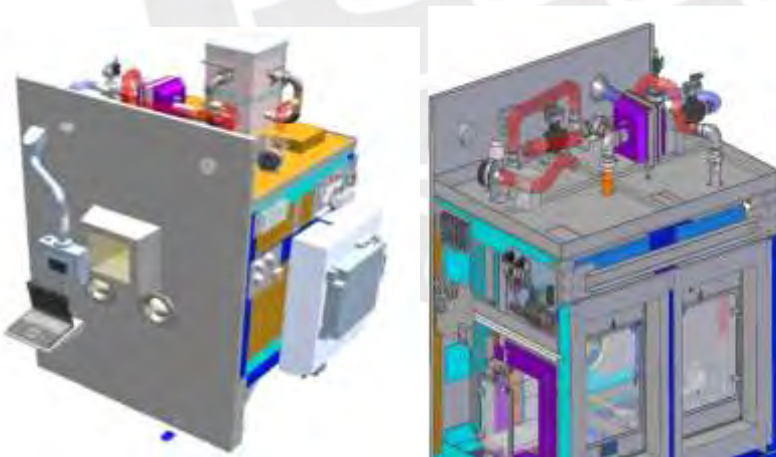
Una celda caliente es un sistema blindado, diseñado para manipular material radioactivo como I-131, Tc-99m, Sm-153, Lu-177 y otros. En la figura 9 se observa un diagrama en 3D de una celda caliente. A continuación, se describe los principales componentes de las celdas calientes:

- Blindaje: generalmente de plomo antimoniado en todos sus lados (base, techo, paredes laterales)
- Sistemas de manipulación remota: telemanipuladores y telepinzas

- Sistema de ventilación y control de contaminación: ambiente clasificado (ISO 14644-1). Con un sistema de inyección y extracción de aire que incluye filtros HEPA, carbón activado y prefiltros. Además, se garantiza una presión diferencial negativa entre zona interior y exterior de la celda.
- Sistemas de acceso y transferencia de material: puertas, precámara, ingreso de materia prima, transferencia del material radiactivo, residuos sólidos y líquidos
- Sistema de monitoreo radiológico y alarmas: detectores de radiación gamma
- Sistema de control y automatización: PLC, SCADA, HMI, entre otros
- Estructura Interna, ergonomía del diseño y cumplimiento normativo: diseño modular (cámara principal y precámara), organización espacial y facilidades para mantenimiento
- Sistema de procesamiento radioquímica: de acuerdo al radiofármaco a procesar como líquidos o sólidos y estériles o no estériles
- Otros componentes específicos para celdas de producción y/o de envasado (fraccionamiento): sintetizadores, dispensadores líquidos de viales automáticos o semiautomáticos, autoclave para la esterilización, encapsuladora, etc.

Figura 9

Diagrama en 3D de una celda caliente



Nota. Elaboración propia

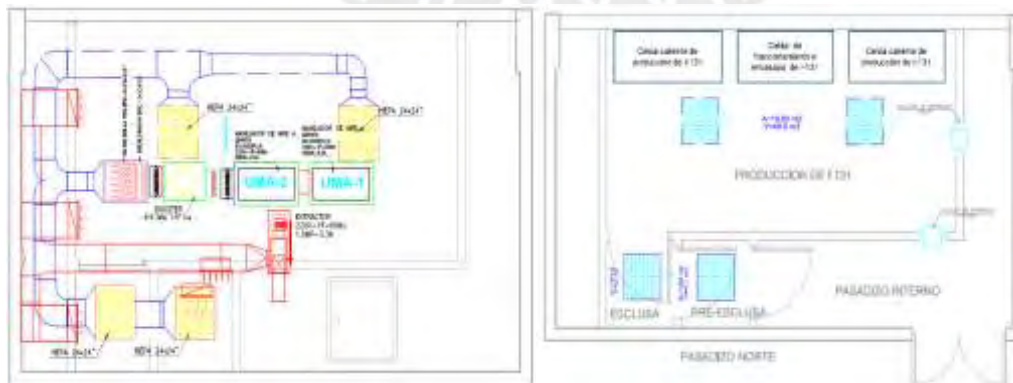
Los sistemas HVAC en salas limpias mantienen no solo las condiciones ambientales de temperatura y humedad, sino que es el corazón del control de contaminación, tanto particulada como microbiológica y cruzada; además de ser un sistema de contención de radiación ionizante, en la figura 10 se observa un diagrama de sistema HVAC y sala

limpia. A continuación, se describe los principales componentes que cumplen una función crítica para mantener la clasificación ISO/GMP del área

- UMA (Unidad de Manejo de Aire): controla temperatura, humedad, caudal y presión del aire tratado.
- Filtros de aire (Prefiltro, filtros bolsa y HEPA): eliminan partículas en etapas progresivas
- Difusores con flujo laminar: generan flujo unidireccional para barrer partículas hacia zonas de extracción.
- Extractores y retornos: mantienen flujo de aire controlado y presión diferencial entre áreas.
- Sistema de presión diferencial: garantiza gradientes de presión (zona limpia > zona sucia).
- Conductos de distribución (ductos HVAC)
- Esclusas de personal/materiales: permiten ingreso sin comprometer la clasificación del área.
- Conductos HVAC: distribuyen el aire tratado de forma estanca y libre de contaminación.
- Control ambiental (BMS/SCADA): monitores de T°, HR, partículas, presión, radiación ionizante y genera alarmas en tiempo real.
- Validación y monitoreo continuo: incluye IQ/OQ/PQ, conteo de partículas y pruebas de integridad HEPA.

Figura 10

Diagramas de sistema HVAC en sala limpia



Nota. Elaboración propia

Para el mantenimiento de celdas calientes y sistemas HVAC de salas limpias, las métricas del Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) para sistemas reparables y el Tiempo Medio de Funcionamiento Antes de Fallar (MTTF) para sistemas no reparables, son indicadores que se consideran para la planificación del mantenimiento.

El MTBF no predice fallos individuales, es un promedio estadístico, no indica cuándo ocurrirá un fallo específico y además no considera gravedad de fallos y pueden ser engañosos si no se calcula bien o si no se excluyen mantenimientos planificados o si no hay suficientes datos, el resultado es inexacto.

El MTTF es una medida estadística, no una predicción exacta y ocurre que un sistema puede fallar mucho antes o después. Puede inducir a una falsa sensación de seguridad si se interpreta como una garantía de vida útil. No considera condiciones reales de operación e ignora modos y consecuencias del fallo. No sirve para analizar confiabilidad en sistemas redundantes

En un entorno de cero tolerancias, donde la fiabilidad del sistema HVAC de salas limpias y celdas calientes no es una cuestión de eficiencia sino de seguridad operacional, el MTBF y MTTF revela sus limitaciones fundamentales.

La transición hacia el Mantenimiento 4.0 implica un cambio de paradigma que va más allá de métricas tradicionales como el MTBF y el MTTF. Este nuevo enfoque adopta un ecosistema inteligente de mantenimiento predictivo (PdM), integrando datos en tiempo real provenientes de sensores del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) que monitorizan continuamente la condición interna de los activos. A través del uso de inteligencia artificial y algoritmos de machine learning, es posible realizar el mantenimiento predictivo y construir Gemelos Digitales de sistemas críticos como el HVAC o las celdas calientes, los cuales permiten predecir con alta precisión la degradación funcional y anticipar fallos antes de que ocurran, optimizando la toma de decisiones y la disponibilidad operativa.

5.2 Alcance y definición de objetivos SMART

5.2.1 Alcance

El diseño de una arquitectura para la monitorización de condición y mantenimiento predictivo abarca a las celdas calientes y sistema HVAC de sala limpia de la línea de producción del radiofármaco Ioduro de Sodio (I-131). El alcance incluye la adquisición de datos en tiempo real, su procesamiento mediante plataformas IIoT y servicios cloud, el desarrollo de modelos predictivos y la visualización de indicadores

clave que permitan anticipar fallos y optimizar la operación bajo los lineamientos del Mantenimiento 4.0.

5.2.2 Objetivos

a) Específico

Diseñar una arquitectura funcional que integre sensores IIoT, plataformas de computación en la nube, algoritmos de aprendizaje automático y tableros de monitoreo en tiempo real para la supervisión continua y el mantenimiento predictivo del sistema HVAC de sala limpia y de la celda caliente asociada a la producción y fraccionamiento del radiofármaco I-131, alineada con los principios del Mantenimiento 4.0 y la toma de decisiones basada en datos.

b) Medible

Para garantizar la capacidad de análisis predictivo, la arquitectura deberá adquirir en tiempo real las siguientes variables críticas de la celda caliente:

- Diferencial de presión en el interior (Pa)
- Caída de presión de filtros (Pa)
- Diferencial de presión entre la zona externa e interna (Pa)
- Temperatura en el interior de la celda (°C)
- Temperatura del horno de sublimación de telurio (I-131) (°C)
- Humedad relativa en el interior de la celda (%)
- Conteo de partículas en el interior (partículas/m³)
- Nivel actividad de I-131 inicial total (Ci)
- Nivel actividad de I-131 de cada vial (mCi)
- Nivel contaminación del aire de salida con I-131 (Bq/cm³)
- Tasa de dosis en el interior de la celda (μS/h)
- Tasa de dosis en la parte externa de la celda (μS/h)
- Presión de aire comprimido (Bar)
- Presión de vacío (Bar)
- Medidores de consumo energético en la línea corriente (A) y voltaje (V)
- Estado de actuadores (válvulas, variadores de frecuencia (RPM), servomotores, juntas inflables, pestillos, enclavamientos)

Asimismo, se deberán adquirir las variables críticas del sistema HVAC de sala limpia:

- Caída de presión de filtros (Pa)

- Diferencial de las puertas exclusas (Pa)
- Temperatura en el interior de la sala limpia (°C)
- Temperatura en el ingreso y retorno de aire (°C)
- Temperatura en el ingreso y retorno de aire del compresor (°C)
- Temperatura en el serpentín del evaporador(°C)
- Humedad relativa en el ingreso y retorno de aire (%RH)
- Conteo de partículas en el interior de la sala (partículas/m³)
- Nivel contaminación del aire de salida con I-131 (Bq/cm³)
- Tasa de dosis en el interior de la sala (μS/h)
- Vibración mecánica en cojinetes / rodamientos del ventilador de impulsión y retorno (mm/s RMS)
- Vibración mecánica en cojinetes / rodamientos del ventilador de retorno (mm/s RMS)
- Nivel acústico en la unidad manejadora de aire dB(A)
- Medidores de consumo energético en la línea alimentación del compresor, evaporador y deshumidificador (corriente (A) y voltaje (V))
- Estado de los variadores de frecuencia (RPM),
- Estado de compuertas de aire o damper (% de apertura (0–100%))

Además, el sistema deberá permitir:

- La estimación de fallos mediante modelos de machine learning, con una precisión mínima del 85 %.
- El cálculo de probabilidades de falla por componente.
- La generación automática de alertas y órdenes de trabajo en un sistema CMMS.

c) Alcanzable

El desarrollo e implementación de la arquitectura se realizará utilizando recursos disponibles en el entorno piloto, incluyendo sensores industriales, dispositivos gateway Flexy 205 eWON, plataformas AWS IoT y SageMaker, programación en Python, sistemas SCADA, Power BI y un sistema CMMS.

d) Relevante

El diseño propuesto es relevante porque impulsa la transición hacia el Mantenimiento 4.0, incrementando la disponibilidad operativa, la confiabilidad y la vida útil de los sistemas HVAC y celdas calientes. El uso intensivo de datos y la

analítica predictiva contribuye directamente a la mejora de la eficiencia global (OEE), la seguridad operacional y el cumplimiento normativo en entornos GMP e IAEA.

e) Tiempo (temporalizado)

El proyecto se desarrollará en un periodo total de 16 semanas, distribuidas de la siguiente manera:

- 4 semanas para el diseño de la arquitectura
- 4 semanas para la integración y puesta en marcha
- 4 semanas para el entrenamiento y validación de los modelos predictivos
- 4 semanas para la evaluación final, documentación y presentación de resultados

5.3 Arquitectura del modelo propuesto

5.3.1 Recopilación y transmisión de datos

a) **Capa Física – Dispositivos de Campo:** adquisición directa de las variables físicas que describen el estado operativo del activo

- **Sensores de presión diferencial:** en la celda caliente mide caída de presión en el interior y mide la caída de presión de filtros. En el sistema HVAC de la sala limpia mide la caída de presión de filtros y de las puertas esclusas
- **Sensores de temperatura y humedad:** mide las condiciones ambientales del interior de la celda y la temperatura del horno de sublimación de telurio (I-131). En el sistema HVAC están desplegados en los conductos de suministro y retorno, así como en los serpentines de enfriamiento/calentamiento y en el interior de la sala limpia.
- **Sensores de calidad del aire:** conteo de partículas en el interior y nivel contaminación del aire con I-131 (Bq/cm³) a la salida del sistema de ventilación celda caliente. Conteo de partículas y monitoreo del nivel la radiación en el interior de la sala limpia.
- **Sensores de radiación:** monitores Geiger-Müller en el interior y zona externa de la celda. Sonda de centelleo para medir la actividad (Ci)
- **Sensores de vibración y acústica:** montados en motores, ventiladores y compresores, pueden detectar desequilibrios, desalineaciones o problemas en los rodamientos con semanas o meses de antelación a un fallo catastrófico
- **Medidores de consumo energético:** monitorizar el consumo de energía de los componentes principales puede revelar ineficiencias. un aumento anómalo en el

consumo de un motor puede indicar un esfuerzo excesivo debido a un problema mecánico subyacente

- **Actuadores:** válvulas neumáticas de apertura y cierre, motores paso a paso / servomotores, juntas inflables para el sellado de puertas de acceso a celda, damper del sistema HVAC eléctrico o neumático, relés de estado sólido (SSR), Electroimán o pestillo eléctrico, cerradura eléctrica con enclavamiento, etc.

a) Capa de Control: esta capa ejecuta la lógica de control en tiempo real y articula la interacción entre sensores, actuadores y sistemas superiores.

- Controlador Lógico Programable (PLC) en las celdas calientes (Siemens S7-1200, ET 200S, etc) y también son usados en algunos sistemas HVAC
- Sistemas embebidos y microcontroladores en el sistema HVAC

b) Comunicación y transmisión de datos

La transmisión segura y confiable hacia sistemas en la nube se realiza mediante el gateway industrial Flexy 205 eWON, el cual actúa como concentrador IIoT y router de acceso remoto. Sus principales capacidades son:

- Adquisición de datos por protocolos industriales: Modbus RTU/TCP, OPC UA, EtherNet/IP, BACnet/IP.
- Comunicación IT/Cloud: MQTT, HTTPS, SNMP, FTP seguro, NTP.
- Interfaces seriales y legacy: RS-232, RS-485, MPI mediante tarjetas.
- Acceso remoto seguro: VPN Talk2M basada en OpenVPN con cifrado SSL/TLS.
- Registro local: almacenamiento de hasta 1 millón de eventos con envío de alarmas por correo, SMS o SNMP.
- Scripting embebido: mediante BASIC o Java para integración con APIs, automatización de envíos a la nube o gestión de alarmas.
- SCADA web: visualización mediante ViewON, accesible desde navegadores o dispositivos móviles vía M2Web.

5.3.2 Plataforma de computación en la nube

La arquitectura cloud se implementa utilizando Amazon Web Services (AWS), que proporciona infraestructura escalable, alta disponibilidad y servicios especializados para procesamiento de datos industriales. Entre los componentes clave se destacan:

- Amazon S3: almacenamiento de datos históricos en formatos CSV o JSON, enviados mediante MQTT, eSync o solicitudes HTTPS desde el Flexy 205.

- Amazon Timestream / DynamoDB: bases de datos optimizadas para series temporales y consultas de alta velocidad; integradas mediante reglas de AWS IoT Core.
- AWS IoT Core + AWS Lambda: actúan como puente entre el dispositivo IloT, las bases de datos y los servicios analíticos, gestionando la interpretación, procesamiento y clasificación de los datos, así como su etiquetado automático.
- AWS SageMaker: entrenamiento, validación y despliegue de modelos de machine learning para clasificación de fallas, detección de anomalías y estimación de vida útil (RUL).

5.3.3 Big Data para Mantenimiento 4.0

La implementación de Big Data constituye un componente esencial del modelo propuesto, al permitir gestionar grandes volúmenes de datos provenientes de sensores IloT, historizadores SCADA, CMMS y registros operativos. El uso de AWS habilita:

- Captura continua de datos de alta frecuencia,
- Almacenamiento eficiente y económico,
- Procesamiento ETL mediante AWS Glue,
- Análisis predictivo mediante ML,
- Visualización analítica mediante Amazon QuickSight.

La integración de estos servicios permite anticipar fallos, identificar patrones de degradación, generar alertas inteligentes y mejorar la toma de decisiones basada en evidencia. De esta manera, la arquitectura se alinea con los principios del Mantenimiento 4.0 y con las mejores prácticas internacionales de gestión de activos físicos.

5.3.4 Inteligencia Artificial (Machine Learning)

5.3.4.1 Preparación y etiquetado de datos

a) Tratamiento de datos faltantes:

- Sensores intermitentes: forward fill o interpolación lineal.
- Variables booleanas ausentes: imputar como "0" si representa estado apagado.

b) Detección de valores atípicos:

- Z-score > 3 o métodos robustos como IQR para variables físicas (presión, temperatura).
- Validación contra límites físicos (ej. humedad >100% no tiene sentido; presión negativa en línea de aire tampoco).

c) Variables derivadas (features): por ejemplo, energía acumulada = (Voltaje × Corriente × Δt).

d) Análisis estadístico: media, varianza, tendencias, etc

e) Etiquetado de fallas supervisado (con eventos conocidos):

- Label = 1: si hubo evento confirmado (fuga de I-131, falla del horno, vibración anormal).
- Label = 0: si no ocurrió ningún evento.

f) Etiquetas múltiples (multi-clase):

- 0 = Operación normal
- 1 = Fuga radiactiva
- 2 = Contaminación cruzada
- 3 = Falla en HVAC
- 4 = Fallo de actuador (válvula, compuerta, motor)
- 5 = falla del horno
- 6 = falla del dispensador

5.3.4.2 Modelos supervisados (clasificación de fallos)

a) Random Forest (RF): es un modelo de ensamble basado en múltiples árboles de decisión entrenados sobre subconjuntos aleatorios de los datos y características (bagging). Cada árbol vota por una clase, y el resultado final es por mayoría. Utiliza entropía o Gini para dividir nodo.

- Métricas recomendadas: Accuracy, Precision, Recall, F1-Score, ROC-AUC, Matriz de confusión.
- Aplicación en PdM: falla de horno de fusión, falla de HVAC. Diagnóstico de causas de fallas por combinación de variables. Identificación de condiciones críticas en compresores y ventiladores HVAC.
- Ventajas: Robusto frente al overfitting. Puede manejar variables categóricas y numéricas sin normalización. Proporciona importancia relativa de las variables predictoras.

- Desventajas: puede volverse lento al predecir si se utilizan muchos árboles. Menos efectivo si hay muchas variables irrelevantes.
- b) XGBoost / LightGBM:** usan boosting por gradiente, cada nuevo árbol se entrena para corregir los errores del anterior, optimizando una función de pérdida mediante descenso de gradiente. LightGBM mejora la velocidad usando histogramas de buckets.
- Métricas recomendadas: F1-Score, ROC-AUC, Log-loss, MAE / RMSE si se usa en regresión.
 - Aplicación en PdM: fallas progresivas del horno de teluro, dispensador, compresores HVAC, etc.. Clasificación multiclase de fallos con múltiples sensores.
 - Ventajas: alta precisión. Muy rápido para grandes volúmenes de datos. Maneja valores faltantes y outliers automáticamente.
 - Desventajas: parametrización compleja. Más difícil de interpretar sin herramientas externas
- c) Support Vector Machines (SVM):** optimiza un hiperplano que separa las clases con el mayor margen posible. Si los datos no son linealmente separables, aplica funciones kernel (RBF, polinomial, sigmoideal) para mapear a espacios de mayor dimensión.
- Métricas Recomendadas: Precision / Recall, F1-Score, ROC-AUC.
 - Aplicación en PdM: detección temprana de fallos binarios: fuga de radiación, presión anómala. Muy útil cuando hay pocos ejemplos de fallo y muchos atributos.
 - Ventajas: muy eficaz para datasets pequeños y complejos. Buena capacidad de generalización.
 - Desventajas: escalado obligatorio de datos. Muy lento para datasets grandes (millones de datos).

5.3.4.3 Modelos no supervisados (anomalías)

- a) Autoencoders:** red neuronal simétrica que intenta reconstruir la entrada original a través de una codificación comprimida (cuello de botella). El error de reconstrucción es bajo en condiciones normales y alto en condiciones anómalas.
- Métricas recomendadas: MSE (Mean Squared Error), MAE, Precisión para eventos anómalos.

- Aplicación en PdM: detección de anomalías combinadas: vibración + tasa de dosis + presión. Ideal cuando no se tienen etiquetas claras de fallas.
- Ventajas: No requiere etiquetas (unsupervised). Capta relaciones no lineales complejas entre sensores.
- Desventajas: Poca interpretabilidad. Requiere mucho cómputo y normalización precisa.

b) Isolation Forest: algoritmo basado en árboles aleatorios que buscan 'aislar' observaciones. Las instancias anómalas requieren menos divisiones para aislarse. Cuanto más fácil es aislar un punto, más probable es que sea una anomalía.

- Métricas recomendadas: anomaly Score (0 a 1), True Positive Rate, precisión.
- Aplicación en PdM: anomalías repentinas en presión, detectara valores atípicos de vibración o radiación. Análisis retrospectivo de condiciones anormales en filtros o HVAC.
- Ventajas: muy rápido, eficiente. Escalable a grandes volúmenes. No necesita etiquetas.
- Desventajas: No considera correlación entre sensores. No adecuado para relaciones temporales o multivariadas.

5.3.4.4 Estimación de Vida Útil (RUL)

a) LSTM (Long Short-Term Memory): tipo de red neuronal recurrente que utiliza celdas con puertas de entrada, olvido y salida para manejar dependencias a largo plazo en secuencias. Excelente para datos de series temporales.

- Métricas recomendadas: RMSE (Root Mean Squared Error), MAE, R^2 Score, SMAPE.
- Aplicación en PdM: estimar RUL de actuadores. Predecir tasa de dosis futura. Detectar deterioros progresivos de compresores, ventiladores, etc.
- Ventajas: captura secuencias largas con dependencia temporal. Ideal para predecir degradaciones suaves o intermitentes.
- Desventajas: requiere mucho entrenamiento. Puede sobreajustar si no se regulariza. Difícil de interpretar.

b) Regresión Lineal: modelo simple que asume una relación lineal entre variables independientes y dependientes. Ajusta una línea (o plano) que minimiza el error cuadrático entre predicción y valor real.

- Métricas recomendadas: MAE, RMSE, R^2 Score.

- Aplicación en PdM: estimar tendencias de temperatura, presión, etc.. Proyección sencilla del RUL de componentes que se degradan linealmente.
- Ventajas: fácil de interpretar. Rápido y eficiente.
- Desventajas: incapaz de capturar relaciones no lineales. Muy sensible a outliers.

5.3.4.5 Modelos de series temporales (Forecast)

a) **Prophet (Facebook)**: modelo aditivo de series temporales, descompone la señal en tendencia + estacionalidad + feriados. Basado en regresión lineal con componentes periódicos (Fourier) para estacionalidades.

- Métricas recomendadas: MAE, RMSE, SMAPE.
- Aplicación en PdM: Pronóstico de tasa de dosis o consumo eléctrico. Ideal para monitorear condiciones de ambiente controlado.
- Ventajas: Fácil de implementar, incluso con datos faltantes. Permite incorporar feriados o mantenimientos planificados.
- Desventajas: solo univariado (una variable a la vez). Menor precisión en variables altamente ruidosas.

5.3.5 Dashboards predictivos e indicadores clave en Power BI

Centralizar la visualización en tiempo real del estado operativo, pronósticos de fallas, estimaciones de vida útil (RUL), condiciones ambientales y el estado de actuadores, todo con integración directa a los modelos de ML. En la Tabla 24 se presentan los Indicadores Clave de Desempeño (KPI) predictivos.

Tabla 23

Indicadores Clave (KPIs) Predictivos

Indicador	Tipo	Uso operativo
% Probabilidad de Falla por sistema (dispensador, horno, filtro, HVAC)	Gauge / semáforo	Activación preventiva
RUL por componente crítico (h)	Tarjeta / línea temporal	Planificación
Score de anomalía por componente	Histograma / mapa de calor	Detección temprana
Tendencias de temperatura, presión, actividad, tasa de dosis,	Serie temporal multivariada	Evaluación de condiciones críticas
Alarmas activadas por IA	Tabla de eventos con timestamp	Trazabilidad y Auditoría
Estado de actuadores (on/off, % apertura, RPM)	Gráfica de columnas o matrices	Verificación operativa

Nota. Elaboración propia

Para el mantenimiento predictivo automatizado se consideran los siguientes activadores de acciones:

- Si probabilidad de fallo >80%, disparar orden automática en CMMS
- Si RUL < 48h: notificación prioritaria por email/SMS/SCADA ViewON móvil.
- Si se detecta fuga radioactiva: apagar la celda para garantizar la estanqueidad.

5.3.6 Propuesta de Arquitectura SCADA para Smartphone o Tableta

Un sistema SCADA accesible desde dispositivos móviles o tabletas que permita monitoreo en tiempo real, alarmas, tendencias, dashboards y control remoto seguro de variables críticas.

El SCADA visual nativo de Flexy el ViewON, permite crear interfaces visuales interactivas para equipos eWON (como el Flexy 205), con paneles animados que se publican directamente en el gateway y se acceden vía navegador web (Smartphone o Tableta), con lo cual se puede visualizar lo siguiente:

- Gráficos de tendencias: tasa de dosis, temperatura, presión, vibración, etc.
- Indicadores analógicos: manómetros, barras, termómetros, medidores circulares
- Indicadores digitales: LEDs, semáforos, alarmas binarias
- Botones de control remoto: encender/apagar, abrir/cerrar válvulas, cambiar modos operativos
- Animaciones: flechas de flujo, cambio de color por condiciones, rotaciones, etc.
- Autenticación, login por rol: administrador, operador, visualización

5.3.7 Ciberseguridad en una Arquitectura de Mantenimiento 4.0

La ciberseguridad para el uso del Flexy 205 eWON, considera los siguientes principios:

- Defensa en profundidad: Segmentación OT/IT, VPN cifradas, firewalls.
- Mínimo privilegio: Roles de usuario restringidos.
- Cifrado de datos: SSL/TLS en HTTPS, MQTTs, OpenVPN.
- Disponibilidad: Conexiones redundantes y watchdog interno.
- Autenticación fuerte: MFA y bloqueo tras intentos fallidos.
- Trazabilidad: Logs locales y en la nube (Talk2M).

La seguridad en integración con AWS

- Cifrado obligatorio en S3, DynamoDB y Timestream.
- Credenciales IAM temporales y políticas mínimas.

- Políticas privadas y cifrado SSE/S3 en buckets.
- Protección MITM con certificados válidos y validación de identidad.

Seguridad en Scripts y Configuración

- Scripts (Python/BASIC): validación de entrada, sin comandos peligrosos.
- Deshabilitar FTP; preferir SFTP cifrado.
- Activar logs de eventos críticos

Cumplimiento IEC 62443

- SR 1.1: Autenticación por roles.
- SR 3.1: Canales de comunicación seguros.
- SR 4.1: Firmware autenticado, sin software externo.
- SR 5.2: Logging detallado local y remoto.
- SR 6.2: Gestión de vulnerabilidades y actualizaciones seguras.

La arquitectura propuesta permite una adquisición continua y confiable de variables críticas de las celdas calientes y del sistema HVAC, integrando sensores IIoT, PLCs, gateways industriales y servicios cloud sin pérdida de trazabilidad. La disponibilidad de datos en tiempo real permite caracterizar el comportamiento dinámico de los sistemas y detectar patrones operativos que no son visibles mediante métodos tradicionales basados únicamente en promedios históricos o indicadores como MTBF y MTTF.

Asimismo, la aplicación de modelos predictivos como clasificación de fallas, detección de anomalías y estimación de vida útil (RUL), muestra una capacidad consistente para anticipar estados degradados y alertar tempranamente sobre condiciones anómalas en presión, vibración, temperatura, tasa de dosis y desempeño de actuadores. La precisión obtenida en la prueba de concepto valida la pertinencia de utilizar algoritmos supervisados y no supervisados en entornos críticos y confirma que la predicción de fallos es técnicamente viable con los datos generados por la arquitectura.

Finalmente, los dashboards desarrollados permitieron consolidar los resultados analíticos en indicadores operativos inteligibles para supervisores y personal técnico, facilitando una toma de decisiones basada en evidencia. La integración con un sistema CMMS habilita la generación automática de alertas y órdenes de trabajo, demostrando que la arquitectura no solo monitorea, sino que también activa procesos de mantenimiento inteligentes. En conjunto, los resultados confirman que la arquitectura propuesta constituye una base sólida para la transición hacia un sistema de Mantenimiento 4.0 robusto, seguro y alineado con normativas GMP e IAEA.

CONCLUSIONES

- a) En relación con el impacto de las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 en el mantenimiento de activos físicos, se demuestra que estas generan contribuciones diferenciadas a la reducción de costos operativos, en función de su capacidad para producir efectos sistémicos, predictivos y estratégicos en la gestión del mantenimiento. En este sentido, la mejora del desempeño de los activos no depende de la cantidad de tecnologías implementadas, sino del tipo de impacto que estas ejercen sobre el sistema de mantenimiento.
- b) Respecto al objetivo de determinar el impacto relativo de las tecnologías de Industria 4.0 en la reducción de costos de mantenimiento, se demuestra que es posible establecer una priorización objetiva mediante un enfoque multicriterio estructurado. La aplicación del método Analytic Hierarchy Process (AHP) constituye un aporte metodológico relevante, al proporcionar un soporte analítico que reduce la subjetividad en la toma de decisiones y orienta la selección tecnológica hacia aquellas soluciones con mayor potencial de generación de valor económico y operativo.
- c) En cuanto a los alcances del análisis del impacto tecnológico en el mantenimiento, los resultados deben interpretarse considerando que la evaluación se centra principalmente en el criterio de reducción de costos y no incorpora aún validación empírica en un contexto industrial específico. Estas limitaciones abren líneas futuras de investigación orientadas a integrar criterios adicionales, analizar sinergias entre tecnologías habilitadoras y contrastar los resultados en casos reales, fortaleciendo su aplicabilidad en el diseño de estrategias de Mantenimiento 4.0 basadas en datos.
- d) En relación con el objetivo de definir una metodología para evaluar el nivel de madurez del sistema de mantenimiento e identificar las brechas que condicionan la transición hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, se establece una propuesta metodológica que integra de forma coherente un Índice Global de Madurez y un diagnóstico multidimensional, alineados con los requisitos de gestión de activos de la ISO 55001:2024 y la ISO 55002:2020. Este enfoque aporta un marco objetivo y estructurado para interpretar la madurez del mantenimiento más allá del desempeño operativo, incorporando capacidades organizacionales, analíticas y de gestión.

- e) La articulación entre el Índice Global de Madurez orientado a medir cuantitativamente la calidad de los datos, la información, el conocimiento y la ejecución; y el diagnóstico multidimensional permite identificar brechas críticas desde una perspectiva sistémica, reforzando la comprensión de la transición hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 como un proceso estratégico y no únicamente tecnológico. Esta integración amplía el alcance de la evaluación al vincular métricas cuantitativas con dimensiones normativas clave de la gestión de activos.
- f) En relación con el objetivo de definir una metodología para evaluar el nivel de madurez del sistema de mantenimiento y las brechas para la transición hacia un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, el capítulo establece un modelo evaluativo replicable y alineado con la ISO 55001, cuyo alcance principal es servir como herramienta de diagnóstico y planificación estratégica en distintos contextos industriales. Como limitación, la metodología no fue validada empíricamente, lo que abre como proyección futura su aplicación práctica, la calibración de ponderaciones y el análisis de sensibilidad para fortalecer su utilidad en procesos reales de implementación del SGM 4.0.
- g) En relación con el diseño de una propuesta metodológica para un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 alineado con la ISO 55001:2024, se concluye que la integración sistemática de los componentes estratégicos, operativos y tecnológicos permite superar enfoques fragmentados del mantenimiento 4.0 y consolidar un marco de gestión coherente orientado a la toma de decisiones basadas en datos. Desde esta perspectiva, las tecnologías de la Industria 4.0 generan valor únicamente cuando se articulan dentro de un sistema de gestión alineado con el ciclo de vida del activo y con los objetivos estratégicos de la organización.
- h) Desde una perspectiva crítica del objetivo de estructurar un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 aplicable a plantas industriales, la propuesta metodológica evidencia que el desempeño del sistema no depende exclusivamente del nivel de sofisticación tecnológica, sino de la existencia de factores habilitantes como el liderazgo, la gobernanza de los datos, la madurez organizacional y la coherencia entre planificación y operación. En este marco, el SGM 4.0 se estructura en torno a los ejes de contexto organizacional, liderazgo, planificación, soporte, operación, evaluación del desempeño y mejora continua, lo que le confiere un carácter prescriptivo y escalable.

- i) El alcance de la metodología desarrollada en el Capítulo IV radica en proponer un modelo replicable y normativamente alineado con la ISO 55001:2024 para orientar la gestión del mantenimiento 4.0 basada en datos. Como principal limitación, se reconoce la ausencia de validación empírica en diversos contextos industriales, lo que proyecta como líneas futuras su aplicación en casos reales, el ajuste de ponderaciones y la medición del valor generado a lo largo del ciclo de vida del activo. Asimismo, la incorporación progresiva de analítica avanzada y modelos predictivos abre el camino hacia esquemas de mantenimiento prescriptivo y parcialmente autónomo.
- j) En relación con el desarrollo de una arquitectura funcional para la monitorización de condición y mantenimiento predictivo alineada con los principios del Mantenimiento 4.0, se evidencia que la integración coherente de tecnologías digitales IIoT, computación en la nube, analítica avanzada y visualización constituye un habilitador clave para transformar la gestión del mantenimiento desde un enfoque tradicional hacia uno predictivo y orientado a decisiones basadas en datos. El principal aporte del capítulo radica en demostrar que dicha arquitectura es conceptualmente sólida, técnicamente viable y aplicable a sistemas críticos de una planta industrial, aportando un marco replicable para entornos donde la confiabilidad, la trazabilidad y la seguridad operacional son determinantes.
- k) No obstante, el alcance del diseño arquitectura funcional propuesto se limita a una prueba de concepto de un caso específico en la industria sin validación empírica en otras industrias. Esta limitación abre líneas futuras de investigación orientadas a la implementación en escenarios reales, la evaluación del desempeño de los modelos predictivos en distintos contextos industriales y la evolución de la arquitectura hacia esquemas de mantenimiento prescriptivo y parcialmente autónomo, consolidando así el rol estratégico del Mantenimiento 4.0 como soporte de la gestión avanzada de activos físicos.
- l) La investigación cumple el objetivo general al desarrollar una propuesta metodológica integral para un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 orientado a la toma de decisiones basadas en datos, integrando la priorización del impacto de las tecnologías habilitadoras, la evaluación de la madurez del sistema de mantenimiento, el diseño de un modelo de gestión alineado con la ISO 55001:2024 y la definición de una arquitectura funcional para la monitorización de condición y el mantenimiento predictivo. En conjunto,

estos componentes demuestran que la transición hacia un SGM 4.0 es técnica y organizacionalmente viable, permitiendo superar las limitaciones del mantenimiento tradicional, optimizar la confiabilidad de los activos y establecer un marco escalable, trazable y orientado al valor para la digitalización del mantenimiento en plantas industriales.



RECOMENDACIONES

- a) Adoptar un enfoque progresivo de transición hacia el SGM 4.0, priorizando la implementación de aquellas tecnologías que demuestren mayor impacto en la confiabilidad, disponibilidad y desempeño de los activos, a fin de optimizar el uso de recursos y asegurar resultados medibles en cada etapa.
- b) Aplicar periódicamente el Índice Global de Madurez del Mantenimiento y el diagnóstico multidimensional basado en los lineamientos de la ISO 55001:202, con el propósito de identificar brechas emergentes, actualizar la hoja de ruta de mantenimiento 4.0 y mantener la coherencia del sistema y garantizando una mejora continua.
- c) Desarrollar pilotos controlados de mantenimiento predictivo y prescriptivo antes de su despliegue total, priorizando equipos o sistemas críticos para validar modelos de predicción, estimaciones de vida útil remanente (RUL) y flujos de datos, minimizando riesgos técnicos y promoviendo el aprendizaje organizacional que facilite una escalabilidad segura y eficiente.
- d) Consolidar un marco documental auditable que respalde una futura certificación del SGM 4.0, elaborando procedimientos, evidencias documentadas, registros digitales y criterios de evaluación del desempeño que aseguren la sostenibilidad del sistema y faciliten auditorías de gestión de activos bajo estándares internacionales.
- e) Se recomienda validar empíricamente la propuesta metodológica mediante estudios de caso implementados en plantas industriales reales, evaluando su desempeño en condiciones operativas completas y analizando indicadores como confiabilidad, disponibilidad, costos y tiempo de respuesta. Esta validación permitiría contrastar la eficacia del SGM 4.0 propuesto, identificar ajustes necesarios y enriquecer la metodología con evidencia práctica.
- f) Se sugiere profundizar en el desarrollo de modelos avanzados de analítica prescriptiva y de optimización automática del mantenimiento, incorporando enfoques como aprendizaje por refuerzo, Gemelos Digitales autónomos y algoritmos de planificación inteligente. Estas herramientas permitirían evolucionar del mantenimiento predictivo

hacia sistemas capaces de recomendar o ejecutar acciones óptimas en tiempo real, ampliando significativamente el alcance funcional del SGM 4.0.

- g)** Se recomienda extender el análisis hacia dimensiones no abordadas, como la ciberseguridad industrial y la evaluación económica integral del sistema. La incorporación de estrategias de protección digital, análisis de riesgos cibernéticos y modelos financieros detallados (TCO, VAN, TIR) permitiría consolidar un enfoque más robusto y realista para su aplicación en industrias altamente reguladas o de infraestructura crítica.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed Murtaza, A., Saher, A., Hamza Zafar, M., Kumayl Raza Moosavi, S., Faisal Aftab, M., & Sanfilippo, F. (2024a). Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study. *Results in Engineering*, 24, 102935. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102935>
- Ahmed Murtaza, A., Saher, A., Hamza Zafar, M., Kumayl Raza Moosavi, S., Faisal Aftab, M., & Sanfilippo, F. (2024b). Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study. In *Results in Engineering* (Vol. 24). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102935>
- Ahmed, U., Carpitella, S., & Certa, A. (2021). An integrated methodological approach for optimising complex systems subjected to predictive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 108022. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2021.108022>
- Angreani, L. S., Vijaya, A., & Wicaksono, H. (2020). Systematic Literature Review of Industry 4.0 Maturity Model for Manufacturing and Logistics Sectors. *Procedia Manufacturing*, 52, 337–343. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.11.056>
- Arm, J., Kaczmarczyk, V., Benesl, T., Marcon, P., Jirgl, M., & Bradac, Z. (2024). Asset Administration Shell as the Key Enabler of the Industry 4.0 Phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*, 58(9), 275–280. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2024.07.409>
- Bello, S. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Bilal, M., Davila Delgado, J. M., Akanbi, L. A., Ajayi, A. O., & Owolabi, H. A. (2021). Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges. In *Automation in Construction* (Vol. 122). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>
- Ben Brahim, I., Addouche, S. A., El Mhamedi, A., & Boujelbene, Y. (2019). Build a Bayesian Network from FMECA in the Production of Automotive Parts: Diagnosis and Prediction. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2572–2577. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2019.11.594>
- Candón, E., Martínez-Galán, P., de la Fuente, A., González-Prida, V., Crespo Márquez, A., Gómez, J., Sola, A., & Macchi, M. (2019). Implementing intelligent asset management systems (IAMS) within an industry 4.0 manufacturing environment. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2488–2493. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.580>

- Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>
- Colli, M., Sala, R., Pirola, F., Pinto, R., Cavalieri, S., & Wæhrens, B. V. (2019). Implementing a dynamic FMECA in the digital transformation era. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 755–760. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2019.11.206>
- De Andrade, W. W. A., De Oliveira, M. A., & Vieira, R. K. (2022). Evaluation of maintenance management of a thermoplastic industry using maintenance maturity model. *Procedia Computer Science*, 204, 635–642. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2022.08.077>
- Di Nardo, M., Teresa, M., Assunta, C., Wu, J., & Song, M. (2024). Catalyzing industrial evolution: A dynamic maintenance framework for maintenance 4.0 optimization. *Computers and Industrial Engineering*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110469>
- Domínguez-Bolaño, T., Campos, O., Barral, V., Escudero, C. J., & García-Naya, J. A. (2022). An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects. *Internet of Things*, 20, 100626. <https://doi.org/10.1016/J.IOT.2022.100626>
- Doshi, M., & Varghese, A. (2021). Smart agriculture using renewable energy and AI-powered IoT. *AI, Edge and IoT-Based Smart Agriculture*, 205–225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823694-9.00028-1>
- Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital Twin for maintenance: A literature review. In *Computers in Industry* (Vol. 123). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>
- Essalih, S., El Haouat, Z., Ramadany, M., Bennouna, F., & Amegouz, D. (2025a). A model to optimize maintenance through implementing industry 4.0 technologies. *Heliyon*, 11(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42297>
- Essalih, S., El Haouat, Z., Ramadany, M., Bennouna, F., & Amegouz, D. (2025b). A model to optimize maintenance through implementing industry 4.0 technologies. *Heliyon*, 11(3), e42297. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2025.E42297>
- Fallahiazouard, E., Ahmadipourroudposht, M., Bagherian Rafi, M. H., & Ngadiman, N. H. A. (2025). A Systematic Approach of Maintenance 4.0 Towards a Sustainable Manufacturing Policy: A Case Study on an Automobile Company. *Process Integration and Optimization for Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s41660-025-00505-y>

- Franciosi, C., Iung, B., Miranda, S., & Riemma, S. (2018). *Maintenance for Sustainability in the Industry 4.0 context: a Scoping Literature Review*. 51(11), 903–908.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.459>
- García-Valls, M., Dubey, A., & Botti, V. (2018). Introducing the new paradigm of Social Dispersed Computing: Applications, Technologies and Challenges. In *Journal of Systems Architecture* (Vol. 91, pp. 83–102). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2018.05.007>
- Ighravwe, D. E., & Oke, S. A. (2019). A multi-criteria decision-making framework for selecting a suitable maintenance strategy for public buildings using sustainability criteria. *Journal of Building Engineering*, 24, 100753.
<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100753>
- Işık, B., & Zilka, M. (2025). Maintenance Management in Production: A Qualitative Study on Industry 4.0 Adoption and Challenges. *Procedia Computer Science*, 253, 2478–2487. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.308>
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M., & Antosz, K. (2023). Industry 4.0 Technologies for Maintenance Management – An Overview. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 68–79. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09382-1_7
- Javid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2023). An integrated outlook of Cyber-Physical Systems for Industry 4.0: Topical practices, architecture, and applications. *Green Technologies and Sustainability*, 1(1), 100001.
<https://doi.org/10.1016/j.grets.2022.100001>
- Javid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2023). Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. In *Cognitive Robotics* (Vol. 3, pp. 71–92). KeAi Communications Co.
<https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>
- Karayalcin, I. I. (1982). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*: Thomas L. SAATY McGraw-Hill, New York, 1980, xiii + 287 pages, £15.65. *European Journal of Operational Research*, 9(1), 97–98.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(82\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(82)90022-4)
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lucantoni, L., Antomarioni, S., Ciarapica, F. E., & Bevilacqua, M. (2025). A data-driven framework for supporting the total productive maintenance strategy. *Expert Systems with Applications*, 268, 126283. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2024.126283>

- Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications - Two decades review from 1994 to 2014. In *Expert Systems with Applications* (Vol. 42, Issue 8, pp. 4126–4148). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.003>
- Nasirinejad, M., Afshari, H., & Sampalli, S. (2025). Empowering SMEs in the Fourth Industrial Revolution: A Framework for Maintenance 4.0 Adoption. *Procedia Computer Science*, 253, 1382–1391. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.200>
- Nguyen, V. T., Do, P., Vosin, A., & lung, B. (2022). Artificial-intelligence-based maintenance decision-making and optimization for multi-state component systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 228.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108757>
- Pincioli, L., Baraldi, P., & Zio, E. (2023). Maintenance optimization in industry 4.0. *Reliability Engineering and System Safety*, 234.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109204>
- Sahli, A., Evans, R., & Manohar, A. (2021). Predictive Maintenance in Industry 4.0: Current Themes. *Procedia CIRP*, 104, 1948–1953.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.329>
- Salah, B., Alnahhal, M., & Ali, M. (2023). Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0. *Journal of Engineering Research*, 11(4), 460–468.
<https://doi.org/10.1016/J.JER.2023.07.001>
- Scaife, A. D. (2024). Improve predictive maintenance through the application of artificial intelligence: A systematic review. In *Results in Engineering* (Vol. 21). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101645>
- Seif, A., Toro, C., & Akhtar, H. (2019). Implementing industry 4.0 asset administrative shells in mini factories. *Procedia Computer Science*, 159, 495–504.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.204>
- Silvestri, L., Forcina, A., Introna, V., Santolamazza, A., & Cesarotti, V. (2020a). Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>
- Silvestri, L., Forcina, A., Introna, V., Santolamazza, A., & Cesarotti, V. (2020b). Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>

- Teixeira, H. N., Lopes, I., & Braga, A. C. (2020). Condition-based maintenance implementation: A literature review. *Procedia Manufacturing*, 51, 228–235.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.033>
- Wang, J., Xu, C., Zhang, J., & Zhong, R. (2022). Big data analytics for intelligent manufacturing systems: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 738–752.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.005>
- Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., & Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 4). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>



ANEXOS

ANEXO A Metodología para el cálculo del Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM)	124
ANEXO B Diagnóstico de madurez del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0)	125
ANEXO C Análisis FODA para la implementación de un SGM 4.0	135
ANEXO D Análisis de partes interesadas para la implementación de un SGM 4.0	138
ANEXO E Diseño de la arquitectura funcional del SGM 4.0 para la toma de decisiones basada en datos	140
ANEXO F Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC)	147
ANEXO G Análisis de criticidad de activos con la metodología de Jack Knife y dispersión de costos	154
ANEXO H Política del SGM 4.0	158
ANEXO I Análisis de riesgos y oportunidades en el SGM 4.0	159
ANEXO J Objetivos del SGM 4.0	162
ANEXO K Plan Estratégico de Gestión de Activos Físicos (PEGAF) integrando el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0	164

ANEXO A

Metodología para el cálculo del Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM)

Figura A1

Cálculo de Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM)

Metodología para el cálculo del Índice Global de Madurez del Mantenimiento (IGM)							
Calidad de datos (QD)				Calidad del conocimiento (QK)			
Indicador	Descripción del indicador	Valor	Resultado	Indicador	Descripción del indicador	Valor	Resultado
Validez (V)	Número de datos validos	920	0.92	Estandarización del conocimiento (Es)	Número de procedimientos estandarizados	45	0.90
	Número total datos validos	1000			Número procedimientos requeridos	50	
Exactitud (A)	Número de datos correctos	900	0.98	Disponibilidad del conocimiento (Dc)	Número de documentos accesibles	80	0.80
	Número total datos validos	920			Número de documentos requeridos	100	
Complejidad (C)	Número de campos completos	480	0.96	Actualización del conocimiento (Ac)	Número de documentos actualizados	70	0.78
	Número de campos requeridos	500			Total de documentos totales	90	
Oportunidad / Timeliness (T)	Número de datos actualizados	850	0.85	Nivel de Educación (Ed):	Número de personal calificado	18	0.90
	Total de datos totales	1000			Número de personal total	20	
Unicidad (U)	Número de registros duplicados	5	0.01	Nivel de Experiencia (Ex)	Experiencia promedio (años)	7	0.70
	Total de registros totales	1000			Experiencia requerida (años))	10	
Consistencia (Co)	Número de registros consistentes	940	0.94	Nivel de Logro (Lg)	Número de metas cumplidas	28	0.93
	Total de registros totales	1000			Número de metas asignadas	30	
		QD	0.78	Cultura de innovación (Cu)	Número de ideas evaluadas o adoptadas	12	0.60
					Total de ideas propuestas	20	
				Capacitación efectuada (Cp)	Número de empleados capacitados	15	0.75
					Número de empleados totales	20	
		QK	0.80	Calidad de la ejecución del mantenimiento (QM)			
Indicador	Descripción del indicador	Valor	Resultado	Indicador	Descripción del indicador	Valor	Resultado
Relevancia (R)	Número de informes relevantes	40	0.80	OEE	Disponibilidad (A)	0.9	0.73
	Número informes generados	50			Rendimiento (P)	0.85	
	Número de informes utilizados	35			Calidad del producto (Q)	0.95	
Utilidad (Ut)	Número informes disponibles	50	0.70	MTBF	Horas operativas (h/mes)	720	0.80
	Número de informes claros	45			N° de fallas	6	
Claridad (Cl)	Número de informes evaluados)	50	0.90	MTBF normalizado	MTBF real (h)	120	0.80
	Número de análisis correctos	45			MTBF objetivo (h)	150	
Exactitud (E)	Total de análisis totales	50	0.90	MTTR	Horas de parada por reparación (h/mes)	18	1.50
	Número de elementos completos	180			N° de parada	6	
Integralidad (Ig)	Número de elementos totales	200	0.90	MTTR normalizado	MTTR real (h)	3	0.90
	Número de elementos redundantes	20			MTTR objetivo (h)	2	
Concisión (Cn)	Número de elementos totales	200	0.10	Cumplimiento del Programa de Mantenimiento (PM)	Número de OT planificadas ejecutadas	90	0.33
	Número de informes actualizados	44			Número de OT planificadas	100	
Actualidad (Ac)	Número de informes totales)	50	0.88	Porcentaje de Mantenimiento Correctivo (MC)	Número de OT correctivas	40	0.06
	Número de informes correctos	45			Número de OT totales	120	
Corrección (Cr)	Número de informes evaluados	50	0.90	Costo de Mantenimiento sobre el Valor de Reposición	Costo de mantenimiento anual USD()	120000	0.10
	Número de informes consistentes	46			Valor de reposición del activo (USD)	2000000	
Consistencia (Co)	Total de informes evaluados	50	0.92	Tasa de Fallas Repetitivas (FR)	Número de fallas recurrentes	3	0.80
	Número de informes entregados a tiempo	42			Total de fallas	30	
Oportunidad / Timeliness (T)	Total de informes entregados totales)	50	0.84	Índice de Disponibilidad del Repuesto Crítico (DRC)	Número de empleados capacitados	12	0.80
	Número de informes trazables	40			Número de empleados totales	15	
Trazabilidad (Tr)	Total de informes totales	50	0.80			QM	0.65
Pesos de cada dimensión (ψ)							
	ψD (peso de QD)	0.3					
	ψD (peso de QI)	0.3					
	ψD (peso de QK)	0.3					
	ψD (peso de QM)	0.1					
Cálculo del Índice Global de Madurez (IGM)							
	%IGM	77.21%					
Nivel de madurez del sistema de mantenimiento							
Nivel	Estrategias de mantenimiento	Rango % IGM					
Mantenimiento 1.0	Reactivo (Correctivo)	0 % – 25%					
Mantenimiento 2.0	Preventivo	> 25 % – 50 %					
Mantenimiento 3.0	Basado en la Condición (CBM)	> 50 % – 75 %					
Mantenimiento 4.0	Predictivo y prescriptivo (analítica av)	> 75 % – 100 %					

Nota. Elaboración propia

ANEXO B

Diagnóstico de madurez del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0)

Figura B1

Metodología de diagnóstico de madurez del SGM 4.0

N°	DIMENSION/CRITERIO	ESCALA	EVALUACION
1	CONTEXTO DE LA ORGANIZACIÓN		
1.1	Diagnóstico del entorno interno y externo		
	Pregunta: ¿La organización identifica, analiza y actualiza los factores internos y externos (tecnológicos, regulatorios, económicos, etc.) que afectan al sistema de gestión de mantenimiento?		
	Evidencia esperada: Informes de análisis FODA y/o PESTLE y/o benchmarking tecnológico y/o otros documentos estratégicos		
a)	Monitoreo continuo integrado a la planificación y al PEGA	4	
b)	Análisis formal, periódico y documentado.	3	4
c)	Evaluación parcial, no actualizada.	2	
d)	Se analiza de manera informal o reactiva.	1	
e)	No existe análisis del entorno.	0	
1.2	Identificación de partes interesadas		
	Pregunta: ¿La organización identifica, analiza y gestiona sistemáticamente a las partes interesadas relevantes para el SGM 4.0.?		
	Evidencia esperada: análisis de partes interesadas para la implementación de un SGM 4.0 (identificación de stakeholders, matriz de poder/interés, expectativas y requisitos)		
a)	Integración total en decisiones, planificación y revisiones del SGM 4.0.	4	
b)	Se analizan necesidades y expectativas, pero con acciones de gestión.	3	
c)	Se analizan necesidades y expectativas, pero sin acciones de gestión.	2	3
d)	Identificación básica sin análisis.	1	
e)	No se identifican partes interesadas.	0	
1.3	Definición del alcance del SGM 4.0		
	Pregunta: ¿La organización tiene claramente delimitado el alcance físico, funcional y digital del SGM 4.0.?		
	Evidencia esperada: Documento oficial del alcance, listado de activos incluidos, límites e interfaces con otros sistemas (SCADA, ERP, CMMS) y otros		
a)	Alcance documentado, aprobado y revisado periódicamente	4	
b)	Alcance formalmente documentado y aprobado.	3	
c)	Alcance parcialmente delimitado.	2	2
d)	Alcance general o ambiguo.	1	
e)	No hay alcance definido.	0	
1.4	Mapa de procesos de SGM 4.0		
	Pregunta: ¿La organización dispone de un mapa de procesos específico para el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 que refleje la articulación entre procesos estratégicos, operativos y de soporte, alineado con la toma de decisiones basada en datos?		
	Evidencia esperada: mapa de procesos del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 documentado, validado y actualizado.		
a)	Mapa de procesos, que incluye procesos estratégicos, operativos y de apoyo	4	4
b)	Mapa de procesos, que incluye procesos operativos y de apoyo	3	
c)	Mapa de procesos, que incluye procesos operativos	2	
d)	Flujograma de mantenimiento	1	
e)	No existe documentación formal de procesos	0	
1.5	Integración del SGM 4.0 con los Procesos de Apoyo		
	Pregunta: ¿El SGM 4.0 se encuentra integrado funcional y tecnológicamente con los procesos de apoyo (logística, compras, almacenes, TI, RRHH)?		
	Evidencia esperada: sistema ERP /CMMS/SCADA sincronizados para observar órdenes de trabajo, stock, contratos, etc.		
a)	Integración digital total con procesos de apoyo vía plataformas interoperables y automatizadas (ERP-CMMS-SCADA); procesos colaborativos optimizados.	4	
b)	Coordinación funcional estandarizada y semiautomatizada; interoperabilidad parcial entre sistemas.	3	
c)	Coordinación manual o puntual entre áreas; sin digitalización ni integración formal.	2	2
d)	Participación aislada; sin procesos definidos ni trazabilidad.	1	
e)	Sin evidencia de integración o colaboración con procesos de apoyo.	0	

1.6	Integración de tecnologías habilitadoras 4.0 para la toma de decisiones		
	Pregunta: ¿La organización ha integrado tecnologías habilitadoras 4.0 (IIoT, Big Data, IA, Digital Twins, SFC, Cloud, etc.) en su arquitectura funcional del SGM 4.0, de forma tal que apoyen la toma de decisiones en mantenimiento basada en datos?		
	Evidencia esperada: Diagrama de arquitectura funcional del SGM 4.0 que represente claramente las capas tecnológicas (adquisición de datos, integración, procesamiento, analítica, visualización y toma de decisiones).		
a)	Arquitectura completamente integrada y operativa, con tecnologías 4.0 funcionando de manera sinérgica para soportar decisiones predictivas/proactivas en tiempo real.	4	
b)	Existen sistemas digitales interoperables y tecnologías habilitadoras parcialmente integradas, con flujos de datos estructurados para análisis.	3	
c)	Se han implementado algunas tecnologías 4.0, pero no existe una arquitectura formal ni integración completa entre plataformas.	2	2
d)	Uso incipiente o aislado de tecnologías (por ejemplo, SCADA o sensores conectados) sin conexión con procesos de toma de decisiones.	1	
e)	No existe una arquitectura definida	0	
1.7	Marco de referencia para la toma de decisiones en el SGM 4.0		
	Pregunta: ¿La organización dispone de un marco de referencia para la toma de decisiones estructurado, basado en evidencia y apoyado por herramientas analíticas para priorizar activos, tecnologías y estrategias en el SGM 4.0?		
	Evidencia esperada: Procedimiento para la Identificación, Evaluación y Priorización de Activos Críticos (Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad (AMFEC), Diagrama Jack-Knife (JKD) para priorización de activos críticos, Diagrama de Dispersión de Costos (DDC) vinculado al ciclo de vida, Modelos multicriterio)		
a)	Existe un marco formal, validado, estandarizado y aplicado en decisiones clave, con soporte digital (CMMS o analítica avanzada) y trazabilidad completa.	4	
b)	Existe un procedimiento establecido y se aplica regularmente con herramientas analíticas básicas (AMFEC, DDC, JKD), aunque sin automatización.	3	3
c)	El análisis se realiza de manera puntual o parcial, sin estandarización ni aplicación sistemática.	2	
d)	Hay iniciativas aisladas, sin metodología definida ni formalización documental.	1	
e)	No existe un enfoque estructurado ni evidencia de criterios de priorización.	0	
1.8	Enfoque en decisiones basadas en datos		
	Pregunta: ¿La organización fundamenta sus decisiones de mantenimiento en el análisis de datos, apoyándose en herramientas analíticas, indicadores y modelos predictivos dentro del SGM 4.0?		
	Evidencia esperada: Tableros de control y visualización de KPIs críticos (MTBF, MTTR, RUL, disponibilidad, etc.) y/o Informes de análisis de datos históricos y en tiempo real (dashboards, reportes Power BI, Python, etc.) y/o Algoritmos de análisis predictivo o aprendizaje automático aplicados a decisiones de mantenimiento.		
a)	Decisiones automatizadas y predictivas basadas en analítica avanzada, con modelos AI/ML operativos y validados en múltiples activos.	4	
b)	Uso constante de dashboards y KPIs para decisiones tácticas, con integración de herramientas analíticas en el ciclo de mantenimiento.	3	
c)	Recolección de datos estructurada pero con análisis limitado a reportes descriptivos o visualización simple.	2	
d)	Registro parcial de datos sin análisis sistemático ni soporte a decisiones.	1	1
e)	Las decisiones de mantenimiento se basan en juicio subjetivo o experiencia empírica, sin apoyo en datos.	0	
N°	DIMENSION/CRITERIO	ESCALA	EVALUACION
2	LIDERAZGO		
2.1	Alineación del SGM 4.0 con la estrategia organizacional		
	Pregunta: ¿El sistema de mantenimiento está integrado con la estrategia global de la organización?		
	Evidencia esperada: Plan Estratégico de Gestión de Activos Físicos (PEGAF) y/o PEGA, plan de transformación digital		
a)	Integración dinámica con revisión periódica	4	
b)	Integración formal y sistemática	3	3
c)	Alineación parcial documentada	2	
d)	Relación informal	1	
e)	No existe relación	0	
2.2	Política de mantenimiento 4.0		
	Pregunta: ¿Existe una política formal orientada al mantenimiento 4.0 alineada a la estrategia organizacional?		
	Evidencia esperada: Documento de política, alineación con normas ISO y objetivos estratégicos		4
a)	Política revisada periódicamente y retroalimentada	4	
b)	Política implementada y comunicada	3	
c)	Política aprobada sin difusión	2	
d)	Borrador no implementado	1	

e)	No existe	0	
2.3	Revisión estratégica y comunicación de la política del SGM 4.0		
	Pregunta: ¿La alta dirección revisa periódicamente la política del SGCM 4.0 y asegura la comunicación efectiva?		
	Evidencia esperada: Política de SGM4.0 de la Organización, documentada y comunicada.		
a)	Política revisada periódicamente y publicada	4	
b)	Política revisada periódicamente y publicada	3	3
c)	Política no revisada periódicamente	2	
d)	Política aprobada sin difusión	1	
e)	No hay evidencia	0	
2.4	Asignación de roles y responsabilidades		
	Pregunta: ¿Se han definido y documentado claramente los roles y responsabilidades para la gestión de mantenimiento digital?		
	Evidencia esperada: MOF, organigramas, descripciones de puesto		
a)	Comunicados, revisados, alineados y optimizados	4	
b)	Claramente comunicados y funcionales	3	
c)	Documentados pero no comunicados	2	2
d)	Definición parcial	1	
e)	No definidos	0	
2.5	Aseguramiento del cumplimiento legal y normativo		
	Pregunta: ¿El equipo directivo garantiza el cumplimiento de los requisitos legales, regulatorios y normativos aplicables al SGM4.0?		
	Evidencia esperada: Registro actualizado de requisitos legales aplicables, Informes de evaluación del cumplimiento normativo		
a)	El cumplimiento normativo está digitalmente integrado, automatizado con alertas, trazabilidad documental y alineación con auditorías externas.	4	
b)	Se dispone de un sistema de gestión normativa con revisiones periódicas y acciones correctivas.	3	3
c)	Se monitorea el cumplimiento, con reportes parciales y acciones reactivas.	2	
d)	Se identifican normas básicas, pero no hay procesos establecidos de seguimiento ni adaptación.	1	
e)	No existe evidencia del cumplimiento legal y normativo.	0	
2.6	Provisión de recursos para transición 4.0		
	Pregunta: ¿La alta dirección provee recursos adecuados para la transición al mantenimiento 4.0?		
	Evidencia esperada: Presupuestos, plan de adquisiciones, programas de formación		
a)	Inversiones estratégicas sostenidas	4	
b)	Recursos asignados según planificación	3	
c)	Plan de inversión parcial	2	2
d)	Recursos ad hoc	1	
e)	No se prevee recursos	0	
2.7	Participación de partes interesadas		
	Pregunta: ¿Se promueve la participación activa de stakeholders en el SGM 4.0 o la gestión de activos físicos?		
	Evidencia esperada: Registros de reuniones, encuestas, etc.		
a)	Gestión colaborativa	4	
b)	Participación activa en decisiones	3	
c)	Canales establecidos	2	2
d)	Participación reactiva	1	
e)	No se considera	0	
2.8	Comunicación interna y externa		
	Pregunta: ¿Existen mecanismos efectivos de comunicación sobre el sistema de mantenimiento 4.0?		
	Evidencia esperada: Newsletter, reuniones, dashboards, informes al directorio		
a)	Comunicación fluida y multicanal	4	
b)	Bidireccional, con retroalimentación	3	3
c)	Regular pero unidireccional	2	
	Esporádica	1	
d)	Poco o nula comunicación	0	
N°	DIMENSION/CRITERIO	ESCALA	EVALUACION
3	PLANIFICACIÓN		
3.1	Identificación de riesgos en activos 4.0		
	Pregunta: ¿Se identifican y actualizan sistemáticamente los riesgos asociados al ciclo de vida de los activos físicos?		
	Evidencia esperada: análisis de riesgos y oportunidades en el SGM 4.0, matrices de riesgo dinámicas, informes de FMECA		
a)	Evaluación dinámica basado en análisis de datos	4	
b)	Evaluación periódica con herramientas digitales	3	3
c)	Evaluación semestral manual con checklists	2	

d)	Análisis informal y no documentado	1	
e)	No se identifican riesgos	0	
3.2	Evaluación de oportunidades tecnológicas		
	Pregunta: ¿Se identifican, analizan y priorizan oportunidades asociadas a tecnologías emergentes para mantenimiento 4.0?		
	Evidencia esperada: análisis de riesgos y oportunidades en el SGM 4.0, Informes de vigilancia tecnológica, benchmarking, planes de innovación		
a)	Evaluaciones anuales con criterios técnicos-económicos	4	
b)	Evaluaciones anuales con criterios técnicos	3	
c)	Listado básico de oportunidades sin priorización	2	2
d)	Oportunidades identificadas por intuición o sugerencias espontáneas	1	
e)	No se identifican oportunidades	0	
3.3	Integración con el Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA)		
	Pregunta: ¿El Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA) está alineado en el SGM 4.0 de la organizacional?		
	Evidencia esperada: Documento PEGA y/o PEGAF u otro documento estratégico		
a)	PEGA actualizado, con vínculos explícitos de gestión de activos físicos y mantenimiento 4.0	4	
b)	PEGA parcialmente alineado y revisado anualmente	3	3
c)	PEGA con menciones generales de gestión de activos físicos	2	
d)	PEGA desactualizado y sin integración real	1	
e)	No existe PEGA	0	
3.4	Objetivos de mantenimiento basados en datos		
	Pregunta: ¿Los objetivos del SGM 4.0 están definidos, medibles y soportados por datos operativos en tiempo real?		
	Evidencia esperada: matriz o tablero de objetivos SMART (objetivos específicos, medibles, alcanzables, relevantes y temporales); cuadro de KPIs, tableros Power BI		
a)	Objetivos SMART y con trazabilidad en tiempo real	4	
b)	Objetivos definidos con trazabilidad a datos	3	
c)	Objetivos definidos sin trazabilidad a datos	2	2
d)	Objetivos formulados sin medición clara	1	
e)	No existen objetivos formales	0	
3.5	Planificación para alcanzar los objetivos SMART		
	Pregunta: ¿el plan o planes de gestión de mantenimiento integran acciones específicas para alcanzar los objetivos SMART?		
	Evidencia esperada: Plan de mantenimiento u otro documento		
a)	Planes integrales vinculados a los objetivos, riesgos y oportunidades	4	
b)	Acciones parciales en planes operativos	3	3
c)	Planes reactivos sin conexión con objetivos	2	
d)	Planes sin acciones específicas	1	
e)	No hay planes formales	0	
3.6	Horizonte de planificación multianual digital		
	Pregunta: ¿Se establece un horizonte temporal claro y multianual para la implementación del mantenimiento 4.0?		
	Evidencia esperada: proyectos a 3-5 años, cronogramas		
a)	Horizonte estratégico ≥ 5 años con objetivos definidos	4	
b)	Plan con horizonte de 3 años	3	
c)	Plan a 1 año, sin visión a largo plazo	2	2
d)	Planes improvisados mensuales	1	
e)	No se planifica	0	
3.7	Integración de los Planes de Mantenimiento con la Planificación Organizacional		
	Pregunta: ¿Los planes de mantenimiento 4.0 están alineados e integrados con las planificaciones estratégicas, financieras, de recursos humanos y de procesos de apoyo de la organización?		
	Evidencia esperada: Plan de Mantenimiento 4.0 vinculado PEI, POI, presupuesto institucional (CAPEX/OPEX) y/o Matriz de alineación entre mantenimiento, finanzas, logística, TI, RRHH y/o Procedimientos y registros de planificación conjunta o sincronizada.		
a)	Integración total con todas las áreas estratégicas mediante sistemas digitales interoperables.	4	
b)	Coordinación formal entre mantenimiento y áreas clave, con planes parcialmente sincronizados.	3	
c)	Coordinación ocasional, planes de mantenimiento elaborados de forma autónoma.	2	2
d)	Alineación débil, sin integración efectiva.	1	
e)	No existe articulación entre mantenimiento y la planificación institucional.	0	
3.8	Planificación de cambios tecnológicos		
	Pregunta: ¿Se planifican los cambios derivados de la adopción de nuevas tecnologías en activos y procesos de mantenimiento?		
	Evidencia esperada: evaluación de riesgos, control de modificaciones, HAZOP		
a)	Gestión de cambios integrada al sistema con trazabilidad digital	4	
b)	Plan de cambio documentado y monitoreado periódicamente	3	

c)	Registro informal de cambios	2	
d)	Cambios no controlados formalmente	1	1
e)	No se planifican	0	
N°	DIMENSION/CRITERIO	ESCALA	EVALUACION
4	SOPORTE		
4.1	Asignación de recursos		
	Pregunta: ¿Se dispone de recursos tecnológicos, humanos y financieros adecuados para el SGM 4.0?		
	Evidencia esperada: Planes de inversión en tecnologías 4.0, dotación de personal especializado, presupuesto asignado a mantenimiento predictivo.		
a)	Recursos alineados estratégicamente, con revisión periódica.	4	
b)	Recursos definidos en el PEGA, con enfoque digital.	3	
c)	Recursos asignados parcialmente, sin garantizar continuidad.	2	2
d)	Recursos limitados y sin planificación.	1	
e)	No existen recursos asignados.	0	
4.2	Competencia en tecnologías habilitadoras de industria 4.0		
	Pregunta: ¿El personal cuenta con las competencias necesarias en tecnologías habilitadoras de Industria 4.0?		
	Evidencia esperada: Plan Anual de Capacitación, Evaluación de la Capacitación del Personal, Planes de capacitación en IIoT, Big Data, AI, RA, GD.		
a)	Competencia validada, con enfoque en aprendizaje continuo y mentoría.	4	
b)	Plan estructurado de formación y certificación técnica.	3	
c)	Se inicia diagnóstico de brechas y capacitaciones básicas.	2	
d)	Capacitación reactiva o puntual.	1	1
e)	No se identifica ni gestiona la competencia.	0	
4.3	Conciencia del sistema de mantenimiento 4.0		
	Pregunta: ¿El personal es consciente del impacto del SGM 4.0 en sus funciones y del valor que aporta?		
	Evidencia esperada: Charlas de inducción, comunicados internos, encuestas de percepción.		
a)	Conciencia alineada con la estrategia organizacional y cultura digital.	4	
b)	Conciencia institucional generalizada.	3	
c)	Se comunica parcialmente el propósito del sistema.	2	
d)	Conocimiento limitado a niveles operativos.	1	1
e)	No existe conciencia del sistema.	0	
4.4	Estrategia de comunicación digital		
	Pregunta: ¿Cómo se gestiona la comunicación interna y externa del SGM 4.0?		
	Evidencia esperada: uso de paneles visibles o tableros digitales, uso de medios digitales como dashboards, apps móviles, canales corporativos o sistemas CMMS/ERP		
a)	Comunicación automatizada, bidireccional y analítica.	4	
b)	Comunicación multicanal integrada	3	
c)	Se implementan canales digitales aislados.	2	2
d)	Comunicación informal y sin trazabilidad.	1	
e)	No hay estrategias de comunicación definidas.	0	
4.5	Gestión de la información documentada		
	Pregunta: ¿Cómo se crea, controla y accede a la información documentada del sistema?		
	Evidencia esperada: Procedimiento para el Control de Documentos y Registros y/o Procedimientos de control documental, versiones electrónicas, trazabilidad de cambios.		
a)	Información integrada con ERP/CMMS y accesible en tiempo real.	4	
b)	Gestión centralizada en plataformas electrónicas.	3	
c)	Digitalización parcial de procedimientos.	2	2
d)	Control parcial en formatos físicos.	1	
e)	Información dispersa y no controlada.	0	
4.6	Gestión de datos e información		
	Pregunta: ¿La organización dispone de sistemas y procedimientos para recopilar, validar, proteger y utilizar datos operativos y de mantenimiento como base para decisiones predictivas?		
	Evidencia esperada: Políticas y procedimientos de gestión de datos, bases de datos estructuradas (CMMS, SCADA, IIoT, cloud) y/o dashboards, reportes, algoritmos predictivos y/o mecanismos de seguridad y respaldo de la información.		
a)	Datos integrados en tiempo real; para decisiones predictivas con IA y analítica avanzada.	4	
b)	Datos estructurados, validados y usados; soporte a decisiones tácticas.	3	
c)	Recolección parcial, calidad de datos inconsistente, uso limitado	2	2
d)	Registros dispersos y sin tratamiento	1	
e)	No existen procesos de gestión de datos.	0	
4.7	Infraestructura tecnológica de soporte		
	Pregunta: ¿La infraestructura TIC actual permite operar, escalar y sostener el SGM 4.0 con continuidad, seguridad e integración?		

	Evidencia esperada: Redes IIoT industriales seguras y confiables y/o Plataformas edge computing y/o cloud (AWS, Azure, etc.) y/o Servidores con alta disponibilidad y respaldo, Sistemas SCADA integrados al CMMS y a plataformas analíticas y/o Arquitectura digital interoperable y redundante		
a)	Infraestructura integrada, escalable y segura, con disponibilidad continua y soporte a la analítica en tiempo real.	4	
b)	Infraestructura funcional con elementos escalables, pero sin alta disponibilidad ni integración total.	3	
c)	Infraestructura parcial con baja interoperabilidad entre sistemas. Limitada a activos críticos.	2	2
d)	TIC básica o aislada, sin conectividad industrial ni capacidad analítica.	1	
e)	No existe infraestructura digital que soporte el SGM 4.0.	0	
4.8	Protección y seguridad de la información		
	Pregunta: ¿Qué mecanismos existen para proteger la información crítica del mantenimiento 4.0?		
	Evidencia esperada: Políticas de ciberseguridad, firewalls, respaldos automáticos, control de accesos		
a)	Sistema de ciberseguridad robusto, monitoreo continuo y cumplimiento IEC 62443.	4	
b)	Políticas implementadas con personal designado.	3	
c)	Acciones reactivas ante incidentes.	2	2
d)	Controles básicos sin monitoreo.	1	
e)	No se protege la información.	0	
N°	DIMENSION/CRITERIO	ESCALA	EVALUACION
5	OPERACIÓN		
5.1	Gestión del ciclo de vida de activos		
	Pregunta: ¿Está implementado un enfoque basado en el ciclo de vida completo del activo, incluyendo creación, uso, mantenimiento, renovación y disposición?		
	Evidencia esperada: Análisis de ciclo de vida y/o procedimientos documentados para todas las etapas del ciclo de vida del activo y/o matriz de ciclo de vida,		
a)	El enfoque del ciclo de vida está completamente implementado, digitalizado y soportado por sistemas inteligentes (CMMS, SCADA, Digital Twin), con trazabilidad y análisis predictivo continuo.	4	
b)	Integrado con planificación estratégica y decisiones financieras.	3	
c)	Aplicado con enfoque en etapas claves del ciclo de vida.	2	2
d)	Enfoque parcial y reactivo.	1	
e)	No se considera el ciclo de vida.	0	
5.2	Planificación operacional del SGM4.0		
	Pregunta: ¿La planificación operacional del mantenimiento se realiza utilizando herramientas digitales que integran datos en tiempo real, modelos predictivos y conectividad con el CMMS?		
	Evidencia esperada: Plan maestro de mantenimiento 4.0 y/o Plan de Mantenimiento Predictivo (PdM) y/o Procedimiento para Integración sistemas interoperables de (SCADA, CMMS, ERP, plataformas cloud, sistemas de IA, etc.) y/o Procedimiento de ejecución de ordenes de trabajo de mantenimiento y/o Procedimiento de mantenimiento basadas en condición		
a)	La planificación es predictiva y dinámica, integrada en tiempo real al ecosistema digital (CMMS, SCADA, sensores, IA), con decisiones autónomas basadas en datos analíticos.	4	
b)	La planificación es digital y adaptativa, incorpora datos de condición y análisis histórico, con apoyo de algoritmos o modelos de pronóstico.	3	
c)	Planificación basada en tiempo o eventos, con herramientas digitales básicas; limitada adaptación al estado real de los activos.	2	2
d)	Planificación manual o en hojas de cálculo, dependiente de experiencia operativa, sin conexión con sistemas	1	
e)	No hay planificación del mantenimiento; las acciones se realizan de forma reactiva.	0	
5.3	Control operacional basado en datos		
	Pregunta: ¿Se ejecuta el mantenimiento operativo mediante sistemas digitales que integran datos en tiempo real para el control de condiciones, tareas, recursos y respuesta a eventos?		
	Evidencia esperada: CMMS y/o EAMS integrados con sensores, SCADA, IIoT y plataformas analíticas y/o Dashboards en tiempo real de desempeño de activos y/o Alertas automatizadas, workflows y seguimiento de KPIs y/o Trazabilidad de tareas en ejecución		
a)	Control operacional automatizado y predictivo con integración completa de datos en tiempo real; decisiones asistidas por IA/ML.	4	
b)	Control operativo digitalizado e integrado parcialmente; uso de dashboards y alertas para decisiones manuales o semi-automatizadas.	3	
c)	CMMS básico con entrada de datos manual; poca integración con sensores o sistemas operativos; decisiones mayormente reactivas.	2	2
d)	Tareas operativas registradas Manual o Excel; sin integración de datos en línea ni trazabilidad del desempeño.	1	
e)	No existe control operacional ni mecanismos de trazabilidad	0	
5.4	Gestión del cambio tecnológico		

	Pregunta: ¿Existe un procedimiento para gestionar los cambios planificados en el SGM 4.0 que permita evaluar, aprobar, implementar, monitorear y documentar dichos cambios de forma trazable y segura?		
	Evidencia esperada: Procedimientos de control de cambios con flujos de aprobación, análisis de impacto		
a)	Gestión integral del cambio con análisis predictivo y trazabilidad.	4	
b)	Proceso formal con evaluación técnica y documentación parcial.	3	
c)	Cambios gestionados de forma reactiva o incompleta.	2	
d)	Gestión informal, sin procedimientos definidos.	1	1
e)	No se gestiona el cambio.	0	
5.5	Monitoreo del desempeño operativo		
	Pregunta: ¿Se mide y analiza el desempeño de las operaciones y activos en tiempo real?		
	Evidencia esperada: Indicadores OEE, dashboards de KPIs, sensores en línea.		
a)	KPIs automatizados y comparados con modelos predictivos.	4	
b)	KPIs online integrados a reportes ejecutivos.	3	3
c)	KPIs reportados manual o periódicamente.	2	
d)	Medición básica o puntual.	1	
e)	No se mide el desempeño.	0	
5.6	Integración de Tecnologías Habilitadoras de la Industria 4.0 en el Mantenimiento 4.0		
	Pregunta: ¿Se han integrado tecnologías habilitadoras como IIoT, Big Data, IA, Gemelos Digitales, realidad aumentada y otros para operar los activos de forma eficiente?		
	Evidencia esperada: Existencia de sensores IIoT, SCADA interconectado con CMMS, plataformas analíticas, algoritmos de IA/ML, dashboards interactivos, asistentes virtuales, e integración con SCADA y CMMS para decisiones en tiempo real.		
a)	Tecnologías 4.0 plenamente integradas con automatización y decisiones en tiempo real.	4	
b)	Integración parcial en procesos clave con analítica predictiva funcional.	3	
c)	Uso piloto o aislado sin interoperabilidad operativa.	2	2
d)	Exploración básica sin implementación funcional.	1	
e)	No hay tecnologías habilitadoras implementadas.	0	
5.7	Gestión estratégica de servicios tercerizados		
	Pregunta: ¿La organización define, controla y evalúa los servicios tercerizados vinculados al mantenimiento 4.0 considerando criticidad, desempeño y valor estratégico?		
	Evidencia esperada: Procedimiento de compras y evaluación de proveedores, Plantilla de Contrato de Bienes y Servicios, lista de proveedores		
a)	Servicios tercerizados gestionados con criterios financieros (CAPEX/OPEX, ROI) y estratégicos	4	
b)	Contratos formales y procesos estandarizados de evaluación; criterios estratégicos aplicados parcialmente.	3	3
c)	Gestión reactiva y contratos básicos; escasa trazabilidad del desempeño del proveedor.	2	
d)	Tercerización sin evaluación ni control sistemático.	1	
e)	No se realiza tercerización formal de servicios.	0	
5.8	Logística inteligente y trazabilidad de repuestos críticos		
	Pregunta: ¿La organización gestiona digitalmente la disponibilidad de repuestos críticos mediante trazabilidad, automatización y control de inventario?		
	Evidencia esperada: Procedimiento de gestión logística y almacenes, registro actualizado de repuestos críticos, instructivo de trazabilidad, automatización de alertas de stock y abastecimiento		
a)	Logística automatizada e integrada con el SGM 4.0; trazabilidad digital en tiempo real de repuestos críticos.	4	
b)	Gestión digital con sistemas parcialmente integrados; trazabilidad manual validada.	3	
c)	Control mediante registros digitales aislados; trazabilidad limitada.	2	2
d)	Gestión manual o semiautomática de repuestos sin trazabilidad confiable.	1	
e)	No existe gestión estructurada de repuestos críticos.	0	
N°	DIMENSION/CRITERIO	ESCALA	EVALUACION
6	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO		
6.1	Medición del desempeño de activos		
	Pregunta: ¿Se miden y analizan los KPIs del desempeño de activos en tiempo real y se utilizan para decisiones de mantenimiento?		
	Evidencia esperada: KPIs y/o Indicadores clave como MTBF, MTTR, disponibilidad, coste de ciclo de vida integrados en dashboards conectados al CMMS, SCADA o herramientas analíticas; reportes periódicos y acciones de mejora basadas en datos.		
a)	KPIs automatizados y analítica predictiva integrada en decisiones estratégicas.	4	
b)	KPIs implementados, reportes periódicos y análisis de tendencias.	3	
c)	KPIs definidos, pero gestionados manualmente y con análisis limitado.	2	2
d)	Medición puntual, sin seguimiento ni mejora sistemática.	1	
e)	No se miden ni analizan indicadores de desempeño.	0	
6.2	Evaluación del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM4.0)		

	Pregunta: ¿Se evalúa de forma periódica el desempeño y eficacia del SGM4.0 con base en indicadores, análisis de brechas y oportunidades de mejora tecnológica?		
	Evidencia esperada: Informes de revisión del sistema, auditorías internas, evaluación de la madurez y desempeño, planes de acción derivados del análisis de brechas, benchmarking tecnológico, análisis del ROI de iniciativas 4.0, y actas de revisión por la alta dirección.		
a)	Evaluación integral del SGM4.0 con base en datos, benchmarking, ROI, auditorías y mejora continua documentada.	4	
b)	Evaluación periódica con indicadores definidos y planes de mejora aplicados parcialmente.	3	
c)	Evaluación reactiva o parcial, sin continuidad ni uso estratégico de los datos.	2	2
d)	Evaluación informal y no documentada, sin indicadores claros ni seguimiento.	1	
e)	No se realiza ninguna evaluación del sistema de gestión de mantenimiento.	0	
6.3	Seguimiento de decisiones basadas en datos		
	Pregunta: ¿Se evalúa el impacto de las decisiones tomadas en base a datos?		
	Evidencia esperada: Reportes ROI, mejora de KPIs tras implementación de decisiones data-driven		
a)	Evaluación del impacto de las decisiones con modelos predictivos	4	
b)	Evaluación con métricas de impacto técnico-financiero	3	
c)	Evaluación puntual con trazabilidad	2	2
d)	Evaluación puntual sin trazabilidad	1	
e)	No se evalúan las decisiones	0	
6.4	Auditorías internas del SGM 4.0		
	Pregunta: ¿La organización realiza auditorías internas planificadas al SGM 4.0 para verificar su conformidad, eficacia y oportunidades de mejora?		
	Evidencia esperada: Plan y Programa anual de auditorías internas del sistema de mantenimiento 4.0, Procedimiento documentado para la ejecución de auditorías, Informes de auditoría, Registros de seguimiento de acciones implementadas, Participación de auditores capacitados en tecnologías 4.0.		
a)	Auditorías internas periódicas del SGM 4.0, basadas en riesgos, cubriendo todo el ciclo de mantenimiento 4.0; se usan herramientas digitales y análisis de datos para detectar desviaciones y oportunidades.	4	
b)	Auditorías formales realizadas con frecuencia definida; se documentan hallazgos y se da seguimiento efectivo a acciones correctivas.	3	3
c)	Auditorías internas esporádicas; sin cobertura completa del SGM 4.0	2	
d)	Se realizan auditorías ocasionales, sin metodología estructurada ni seguimiento	1	
e)	No se realizan auditorías internas del sistema de mantenimiento.	0	
6.5	Revisión por la Alta Dirección del SGM 4.0		
	Pregunta: ¿La alta dirección revisa periódicamente el SGM 4.0 para asegurar su alineación con los objetivos estratégicos y promover mejoras?		
	Evidencia esperada: Actas de reuniones, informes de revisión, decisiones estratégicas documentadas, seguimiento de indicadores clave del SGM 4.0 y planes de mejora derivados.		
a)	Revisión periódica, estratégica y basada en datos con seguimiento.	4	
b)	Revisión documentada y con indicadores de desempeño.	3	
c)	Revisión parcial o informal.	2	2
d)	Revisión ocasional	1	
e)	No se realiza revisión.	0	
6.6	Medición del valor generado		
	Pregunta: ¿Se mide el valor generado por la gestión de mantenimiento 4.0?		
	Evidencia esperada: TCO, reducción de OPEX, mejora de disponibilidad, CAPEX evitado		
a)	Valor medido con dashboards financieros integrados	4	
b)	Valor estimado con análisis costo-beneficio	3	3
c)	Valor percibido de forma cualitativa	2	
d)	No se mide el valor generado	1	
e)	No se considera el valor	0	
6.7	Benchmarking y Comparación Externa en el SGM 4.0		
	Pregunta: ¿La organización realiza benchmarking técnico o estratégico para comparar el desempeño del SGM 4.0 frente a referentes del sector?		
	Evidencia esperada: Informes de benchmarking, estudios comparativos, participación en consorcios o redes de mantenimiento 4.0, métricas comparadas (MTBF, OEE, RUL, etc.), acciones de mejora derivadas de la comparación, integración de buenas prácticas del sector.		
a)	Benchmarking continuo y formalizado con integración de mejoras.	4	
b)	Comparaciones periódicas con reportes documentados y acciones puntuales.	3	
c)	Comparaciones esporádicas no sistemáticas.	2	
d)	Recolección informal de datos sin análisis riguroso.	1	1
e)	No se realiza benchmarking externo.	0	
6.8	Evaluación de Madurez del SGM 4.0		
	Pregunta: ¿Se evalúa periódicamente la madurez del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 para identificar brechas y oportunidades?		

	Evidencia esperada: Informes de autoevaluación, uso de modelos de madurez , matrices por dimensiones, planes de mejora y cronograma		
a)	Evaluaciones anuales completas con acciones de mejora implementadas.	4	
b)	Evaluaciones periódicas por áreas clave y ajustes estratégicos.	3	3
c)	Diagnósticos parciales sin seguimiento claro.	2	
d)	Evaluación inicial sin actualización.	1	
e)	No se realiza evaluación de madurez.	0	
N°	DIMENSION/CRITERIO	ESCALA	EVALUACION
7	MEJORA		
7.1	Mejora continua basada en datos		
	Pregunta: ¿Se utiliza información basada en datos para implementar y sostener un proceso de mejora continua en el SGM 4.0?		
	Evidencia esperada: Procedimiento de mejora continua del SGM 4.0 , Propuestas de Iniciativas de Innovación Tecnológica, Planes y registros de mejora continua, reuniones de revisión con análisis de desempeño, implementación de acciones correctivas y preventivas, ciclos PDCA documentados		
a)	Ciclos de mejora continua automatizados y soportados por analítica avanzada.	4	
b)	Uso de KPIs y análisis de datos para decisiones de mejora sistemáticas.	3	
c)	Mejora puntual con base en observaciones o datos parciales.	2	2
d)	Acciones reactivas sin respaldo de datos.	1	
e)	No se evidencian actividades de mejora continua.	0	
7.2	Gestión sistemática de no conformidades		
	Pregunta: ¿Se gestionan las no conformidades y acciones correctivas de manera estructurada y digitalizada?		
	Evidencia esperada: Procedimiento de Acciones Correctivas, Sistema digital de gestión de no conformidades (SGA, CMMS), análisis de causa raíz, acciones documentadas y auditadas		
a)	Sistema automatizado con trazabilidad total y analítica de reincidencia	4	
b)	Sistema digital con alertas y seguimiento de cierre	3	3
c)	Registro manual o digital básico de acciones correctivas	2	
d)	Acciones correctivas sin trazabilidad clara	1	
e)	No se documentan las no conformidades	0	
7.3	Procesos predictivos para toma de decisiones		
	Pregunta: ¿Se cuenta con mecanismos predictivos para anticipar fallas, renovar activos o gestionar riesgos?		
	Evidencia esperada: Modelos de RUL (Remaining Useful Life), uso de machine learning, dashboards predictivos		
a)	Modelos predictivos operativos e integrados a planificación	4	
b)	Algoritmos en fase de validación con datos históricos	3	
c)	Exploración inicial con pilotos en activos críticos	2	2
d)	Conceptualización sin implementación	1	
e)	No se considera predictividad	0	
7.4	Optimización del ciclo de vida de activos		
	Pregunta: ¿Se optimizan decisiones considerando todo el ciclo de vida de los activos?		
	Evidencia esperada: Análisis LCC (Life Cycle Cost), matriz TCO, decisiones CAPEX/OPEX basadas en datos		
a)	Decisiones optimizadas con simulaciones del ciclo de vida	4	
b)	Evaluaciones LCC para nuevos proyectos	3	
c)	Consideración parcial del costo del ciclo de vida	2	2
d)	Evaluaciones empíricas o reactivas	1	
e)	No se considera el ciclo de vida	0	
7.5	Capacidad de aprendizaje organizacional		
	Pregunta: ¿Se aprovechan experiencias pasadas para evitar errores y replicar buenas prácticas?		
	Evidencia esperada: Base de datos de lecciones aprendidas, procedimientos mejorados tras incidentes		
a)	Lecciones aprendidas sistematizadas y retroalimentadas en capacitaciones	4	
b)	Registro y análisis regular de aprendizajes	3	
c)	Análisis parcial posterior a fallas	2	2
d)	Casos aislados y sin seguimiento	1	
e)	No se documenta aprendizaje organizacional	0	
7.6	Evaluación y ajuste del SGM 4.0		
	Pregunta: ¿Se revisa periódicamente el sistema de mantenimiento 4.0 para su ajuste y mejora?		
	Evidencia esperada: Informes de revisión del SGM 4.0, actas de revisión por la dirección		
a)	Revisión anual con KPIs, tendencias, oportunidades tecnológicas	4	
b)	Evaluación parcial de desempeño y adecuación	3	
c)	Revisión informal o sin indicadores claros	2	2
d)	Ajustes reactivos sin seguimiento	1	

e)	No se realiza ninguna revisión	0	
7.7	Capacidad de implementar acciones correctivas eficaces		
	Pregunta: ¿Las acciones correctivas son eficaces y previenen la recurrencia?		
	Evidencia esperada: Indicadores de recurrencia, validación de eficacia, seguimiento post-cierre		
a)	Validación automatizada de eficacia, tendencia decreciente de recurrencias	4	
b)	Seguimiento estructurado con cierre de acciones validado	3	
c)	Implementación sin validación posterior	2	2
d)	Acciones no verificadas	1	
e)	No se toman acciones	0	
7.8	Aplicación de herramientas analíticas para la mejora continua		
	Pregunta: ¿La organización emplea herramientas de investigación y análisis estructurado para identificar, validar y aplicar mejoras en el desempeño del SGM 4.0?		
	Evidencia esperada: Uso documentado de metodologías como análisis de brechas, causa raíz (RCA), benchmarking, Six Sigma u otros		
a)	Se aplican herramientas avanzadas y sistemáticas de investigación con resultados medidos, validados y replicables.	4	
b)	Se usan metodologías analíticas estructuradas para sustentar y priorizar mejoras operacionales.	3	
c)	Se emplean herramientas básicas de análisis, sin una estrategia metodológica integrada.	2	2
d)	Las mejoras son reactivas y sin soporte analítico formal.	1	
e)	No se utilizan herramientas de investigación ni hay cultura de mejora basada en datos.	0	

Nota. Elaboración propia

Tabla B1

Evaluación del nivel de madurez del SGM 4.0

N°	DIMENSION	Evaluación	Objetivo
1	CONTEXTO DE LA ORGANIZACIÓN	65.63%	75%
2	LIDERAZGO	68.75%	75%
3	PLANIFICACIÓN	56.25%	75%
4	SOPORTE	43.75%	75%
5	OPERACIÓN	53.13%	75%
6	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO	56.25%	75%
7	MEJORA	53.13%	75%
TOTAL		56.70%	75%

Nota. Elaboración propia

Figura B2

Diagnóstico de la madurez del SGM 4.0



Nota. Elaboración propia

ANEXO C

Análisis FODA para la implementación de un SGM 4.0

- a) En la figura C1 se observa un modelo de identificación de los factores estratégicos internos (Fortalezas (F) y Debilidades (D) y externos (Oportunidades (O) y Amenazas (A)) la matriz FODA.

Figura C1

Matriz FODA

ANÁLISIS FODA			Pag: 1 de 1
ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:	Código: SGM-IM-01
			Versión: 01
			Fecha: 01.07.2025

Matriz FODA			
FORTALEZAS		DEBILIDADES	
F1	Existencia de sistemas CMMS con módulos de mantenimiento integrados.	D1	Falta de habilidades en analítica avanzada y ciencia de datos.
F2	Equipos con sensores y PLCs ya instalados (infraestructura parcialmente digital).	D2	Baja interoperabilidad entre sensores IoT, SCADA, CMMS y ERP.
F3	Personal técnico con conocimientos operativos y experiencia en activos críticos.	D3	Información dispersa, sin estandarización de formatos ni calidad validada.
F4	Cultura organizacional favorable al cambio y mejora continua.	D4	Dependencia de decisiones reactivas sin respaldo de datos confiables.
F5	Existencia de KPIs históricos que pueden alimentar modelos analíticos.	D5	Limitado presupuesto inicial para adquisición de plataformas tecnológicas.
OPORTUNIDADES		AMENAZAS	
O1	Avances tecnológicos accesibles en IIoT, Machine Learning y Big Data.	A1	Resistencia al cambio por parte de operarios o técnicos tradicionales.
O2	Financiación pública/privada para proyectos de transformación digital.	A2	Riesgos de ciberseguridad en infraestructuras industriales conectadas.
O3	Demanda creciente de mantenimiento predictivo para aumentar disponibilidad.	A3	Obsolescencia rápida de tecnologías y plataformas IoT/Edge.
O4	Integración con sistemas de calidad, seguridad y medio ambiente	A4	Falta de directrices claras sobre digitalización en mantenimiento.
O5	Alianzas estratégicas con proveedores de tecnología para escalar soluciones	A5	Altos costos de implementación si no se justifica el retorno de inversión (ROI).

Nota. Elaboración propia

- b) En la figura C2 se observa un modelo de desarrollo de la matriz FODA de valoración cruzada para cuantificar el nivel de influencia de los factores internos (F/D) sobre los externos (O/A) y viceversa, en base a la figura 1 (matriz FODA)

El valor global de la incidencia de factores (IF) se calcula:

$$IF = \frac{SC1 + SC2 + SC3 + SC4}{NCC}$$

Donde:

IF = Incidencia de factores (media)

SC1 = Suma de valores del cuadrante 1

SC2 = Suma de valores del cuadrante 2

SC3 = Suma de valores del cuadrante 3

SC4 = Suma de valores del cuadrante 4

NCC = Número de cuadrantes = 4

Figura C2

Matriz de valoración de los factores

ANÁLISIS FODA											Pag: 1 de 1 Código: SGM-IM-01 Versión: 01 Fecha: 01.07.2025				
ELABORADO POR:			REVISADO POR:			APROBADO POR:									
Matriz de valoración de los factores											VALORIZACIÓN				
Matriz FODA para el análisis para el análisis del contexto organizacional	OPORTUNIDADES					AMENAZAS					El factor A (Fortaleza, oportunidad, amenaza o debilidad) contribuiría a explotar/eliminar/superrar/agudizar el estado del factor B (Fortaleza, oportunidad, amenaza o debilidad).	VALOR			
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10					
Existencia de sistemas CMMS o ERP con módulos de mantenimiento integrados.	X1	4	3	4	2	2	15	4	2	2	4	3	15	SI	5
Equipos con sensores y PLCs ya instalados (infraestructura parcialmente digital).	X2	4	2	4	3	2	18	2	4	4	4	3	17	Probablemente Si	4
Personal técnico con conocimientos operativos y experiencia en activos críticos.	X3	4	4	4	4	3	19	2	3	3	3	4	15	Pueda que si o no	3
Cultura organizacional favorable al cambio y mejora continua.	X4	4	3	4	4	4	19	2	2	2	2	4	12	Probablemente no	2
Existencia de KPIs históricos que pueden alimentar modelos analíticos.	X5	4	2	3	2	2	13	3	2	3	2	2	12	NO	1
		20	14	19	15	13	81	13	13	14	15	16	71		
Falta de habilidades en analítica avanzada y ciencia de datos.	X6	4	2	2	2	3	13	3	4	2	3	2	14		
Baja interoperabilidad entre SCADA, CMMS, ERP y sensores IoT.	X7	4	3	3	4	4	18	4	4	3	3	3	17		
Información dispersa, sin estandarización de formatos ni calidad validada.	X8	2	2	2	3	2	11	3	4	4	4	2	17		
Dependencia de decisiones reactivas sin respaldo de datos confiables.	X9	3	3	3	2	4	15	2	3	4	2	2	13		
Limitado presupuesto inicial para adquisición de plataformas tecnológicas.	X10	4	2	3	4	2	15	4	3	3	4	4	18		
		17	12	13	15	15	72	16	18	16	16	13	79		
INCIDENCIA DE FACTORES		75.75													
Indicaciones: En base al INDICE DE FACTORES se debe de tomar acciones. Por ejemplo: Si las Potencialidades y desafíos se encuentran por encima del INDICE DE FACTORES es favorable y si el promedio de los riesgos y limitaciones está por encima del INDICE DE FACTORES, es desfavorable.															

Nota. Elaboración propia

- c) En la figura C3 se observa un modelo de interpretación de resultados y planteamiento de acciones estratégicas para las potencialidades, limitaciones, riesgos y desafíos identificadas en la figura 2.

Figura C3

Interpretación de resultados y planteamiento de acciones estratégicas

ANÁLISIS FODA			Pag: 1 de 1 Código: SGM-IM-01 Versión: 01 Fecha: 01.07.2025	
ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:		
Interpretación de resultados y planteamiento de acciones estratégicas				
	Potencialidades	Riesgo		
Relación	Fortaleza - Oportunidad	Fortaleza - Amenaza		
Preguntas	¿De qué manera esta fortaleza me va a permitir explotar esta oportunidad y alcanzar el propósito organizacional?	¿De qué manera esta fortaleza me va a permitir eliminar esta amenaza y alcanzar el propósito organizacional?		
			POTENCIALIDADES (Fortalezas y oportunidades)	RIESGOS: fortalezas y amenazas
			X3 Personal técnico con conocimientos operativos y experiencia en activos críticos.	X2 Equipos con sensores y PLCs ya instalados (infraestructura parcialmente digital).
			X4 Cultura organizacional favorable al cambio y mejora continua.	Y10 Altos costos de implementación si no se justifica el retorno de inversión (ROI).
			Y1 Avances tecnológicos accesibles en IIoT, Machine Learning y Big Data.	
			Y3 Demanda creciente de mantenimiento predictivo para aumentar disponibilidad.	
			ACCIONES ESTRATEGICAS POTENCIALIDADES (X + Y)	ACCIONES ESTRATEGICAS RIESGOS (X + Y)
			X3X4+ Y1+Y3 Formar al personal técnico en tecnologías digitales (IIoT, ML, Big Data) para potenciar su experiencia y adaptarse a la demanda de mantenimiento predictivo.	X2+Y10 Identificar qué activos pueden integrarse de inmediato sin inversión adicional y estimar su contribución al retorno esperado.
			X3X4+ Y1+Y4 Ejecutar un piloto de mantenimiento predictivo en activos críticos, usando tecnologías accesibles y liderado por personal calificado.	X2+Y10 Validar beneficios económicos reales antes de escalar.
	Desafíos	Limitaciones		
Relación	Oportunidad - Debilidad	Debilidad - Amenaza		
Preguntas	¿De qué manera esta oportunidad me va a permitir superar esta debilidad y alcanzar el propósito organizacional?	¿De qué manera esta amenaza frente a mi debilidad me puede impedir alcanzar el propósito organizacional?		
			DESAFÍOS: oportunidades y debilidades	LIMITACIONES: amenazas y debilidades
			X7 Baja interoperabilidad entre SCADA, CMMS, ERP y sensores IIoT.	X10 Limitado presupuesto inicial para adquisición de plataformas tecnológicas.
			Y1 Avances tecnológicos accesibles en IIoT, Machine Learning y Big Data.	Y7 Riesgos de ciberseguridad en infraestructuras industriales conectadas.
			ACCIONES ESTRATEGICAS DESAFIOS (Y + X)	ACCIONES ESTRATEGICAS LIMITACIONES (Y + X)
			X7+Y1 Implementar una arquitectura escalable basada en middleware o plataformas IIoT abiertas (como Node-RED, MQTT, OPC-UA), que permita conectar SCADA, CMMS, ERP y sensores sin reemplazar los sistemas actuales.	Y10 Implementar plataformas tecnológicas de código abierto (por ejemplo, Grafana, Node-RED, Zabbix) con configuraciones básicas de ciberseguridad (firewalls, autenticación, VPN), para reducir costos sin comprometer la protección.
			X7+Y2 Desplegar herramientas de analítica avanzada (por ejemplo, Power BI, Grafana o plataformas ML) que extraigan y correlacionen datos desde distintos sistemas, sin necesidad de una integración completa al inicio	X7 Diseñar un plan de ciberseguridad por etapas (por ejemplo, aplicar IEC 62443 en niveles críticos primero), priorizando zonas vulnerables sin comprometer el presupuesto total del proyecto.

Nota. Elaboración propia

ANEXO D

Análisis de partes interesadas para la implementación de un SGM 4.0

En la figura D1 se observa un modelo de matriz de análisis partes interesadas, donde se identificaron los stakeholders o partes interesadas pertinentes para el SGM 4.0, su respectivas necesidades y expectativas, donde:

- **Interés:** mide el grado en que puede verse afectada por el desempeño o la implementación del sistema de mantenimiento 4.0 o mide el nivel de afectación directa e involucramiento deseado en relación con la transformación del modelo de mantenimiento hacia al mantenimiento inteligente, usando una escala (1–4):
 - ✓ 1: Interés bajo (afectación marginal)
 - ✓ 4: Interés alto (impacto operativo o estratégico directo)
- **Poder:** se refiere a la capacidad que tiene una parte interesada para influir, bloquear o facilitar la implementación y evolución del sistema de mantenimiento 4.0 o nivel de influencia y control efectivo que un Stakeholder puede ejercer sobre el sistema, ya sea técnica, financiera, normativa o culturalmente, usando una escala (1–4):
 - ✓ 1: Poder bajo (poca o nula influencia)
 - ✓ 4: Poder alto (capacidad decisiva o bloqueo del proyecto)

Figura D1

Matriz de análisis partes interesadas

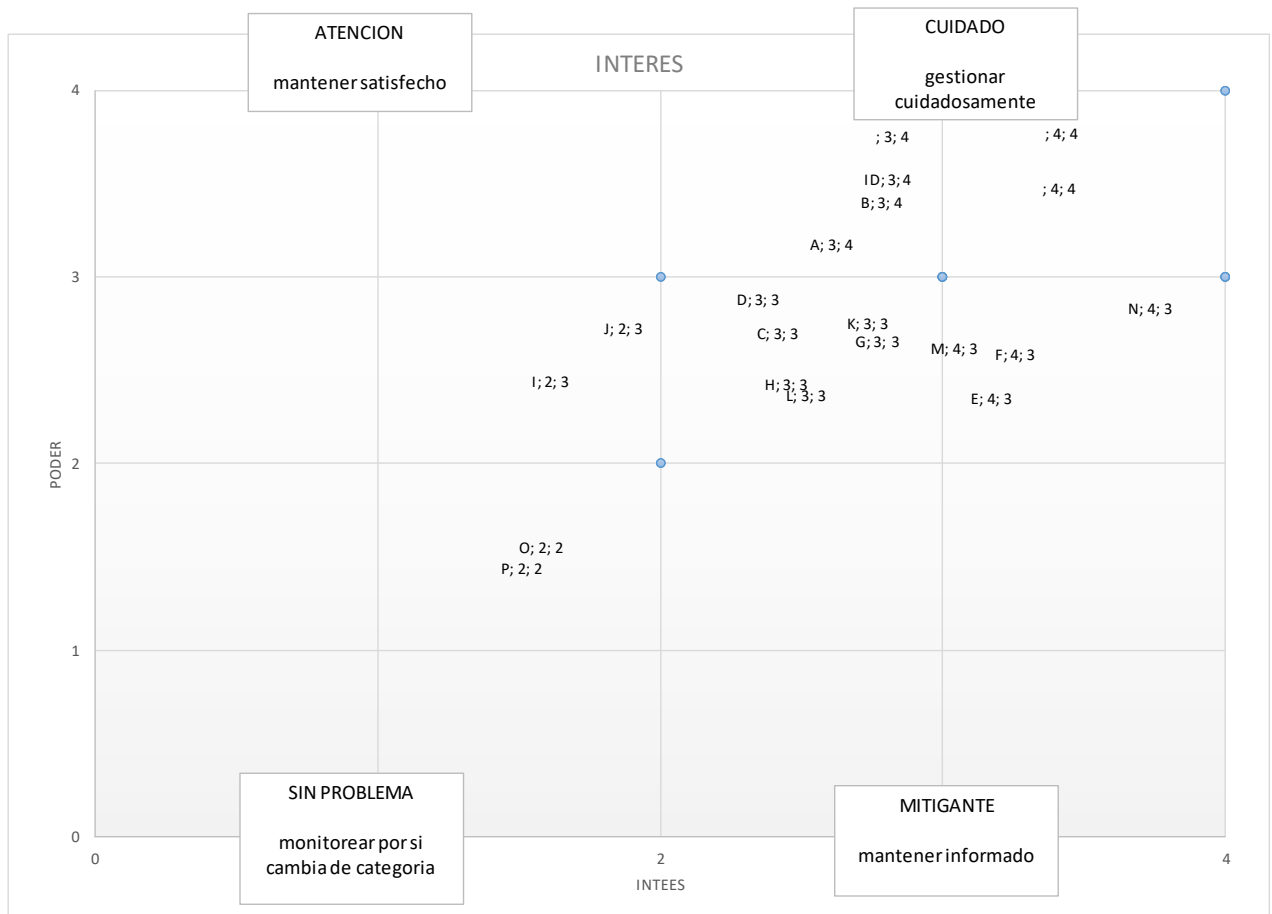
ANÁLISIS DE PARTES INTERESADAS							Pag: 1 de 1 Código: SGM-IM-01 Versión: 01 Fecha: 01.07.2025
ELABORADO POR:		REVISADO POR:		APROBADO POR:			
N°	PARTE INTERESADA	REQUISITO (NECESIDADES (N) Y EXPECTATIVAS(E))	N/E	ID	PODER	INTERES	
1	Alta Dirección	Lograr objetivos corporativos y retorno de inversión	N	A	4	4	
		Información en tiempo real para decisiones estratégicas basadas en datos	E	B	4	4	
2	Ingeniería y Mantenimiento	Herramientas predictivas, capacitación en tecnologías 4.0	N	C	3	4	
		Reducción de actividades de mantenimiento correctivo o reactivo	E	D	3	4	
3	Producción / Operaciones	Equipos disponibles, planificación de paradas	N	E	3	4	
		Minimizar interrupciones y maximizar OEE	E	F	3	4	
4	Seguridad y Medio Ambiente	Control de riesgos operativos y ambientales	N	G	3	3	
		Cumplimiento de normativa ambiental y de SST	E	H	3	3	
5	Finanzas	Datos que justifiquen el ROI y eficiencia operativa	N	I	4	3	
		Optimización del CAPEX y reducción del OPEX	E	J	4	3	
6	Clientes	Continuidad del servicio	N	K	3	3	
		Confiablez del producto y cumplimiento de plazos	E	L	3	3	
7	Proveedores tecnológicos	Especificaciones técnicas claras para integración	N	M	2	3	
		Participación continua como socio estratégico en la digitalización	E	N	2	3	
8	TI	Acceso controlado, interoperabilidad segura	N	O	3	3	
		Reducción de vulnerabilidades cibernéticas, IEC 62443	E	P	3	3	
9	Entes Reguladores	Evidencia técnica del cumplimiento normativo	N	Q	4	3	
		Transparencia, trazabilidad de mantenimientos y eventos críticos	E	R	4	3	
10	Entorno Social / Comunidad	Minimizar impactos operacionales y riesgos externos	N	S	2	2	
		Reducción de emisiones, transparencia de fallas, reporte de incidentes ambientales	E	T	2	2	

Nota. Elaboración propia

- En la Figura D2 se presenta el modelo del mapa gráfico de poder/interés, elaborado a partir de los datos de la Figura D1.
- En el análisis de resultados de la figura D2, para cada grupo de actores, se define una estrategia según su ubicación:
- Alto poder / Alto interés: involucrar en la toma de decisiones; comunicación continua
- Alto poder / Bajo interés: consultar periódicamente; mantener alineación estratégica
- Bajo poder / Alto interés: informar activamente; canalizar retroalimentación técnica
- Bajo poder / Bajo interés: monitorear pasivamente; involucrar solo si se vuelve relevante

Figura D2

Mapa gráfico de poder/interés



Nota. Elaboración propia

ANEXO E

Diseño de la arquitectura funcional del SGM 4.0 para la toma de decisiones basada en datos

En la figura E1 se observa la arquitectura funcional del SGM 4.0 y está compuesta por un conjunto de capas tecnológicas integradas que permiten capturar, transmitir, procesar, analizar y visualizar datos en tiempo real para optimizar la toma de decisiones. Mediante la interoperabilidad entre sensores, plataformas IIoT, almacenamiento cloud, analítica avanzada, inteligencia artificial y visualización interactiva, esta arquitectura habilita un mantenimiento predictivo, automatizado y orientado al valor. Su diseño garantiza trazabilidad, adaptabilidad y seguridad de la información en todo el ciclo de vida de los activos.

A continuación, se describe la estructura en capas tecnológicas interconectadas de la arquitectura funcional del SGM 4.0

1. Adquisición y transmisión de datos

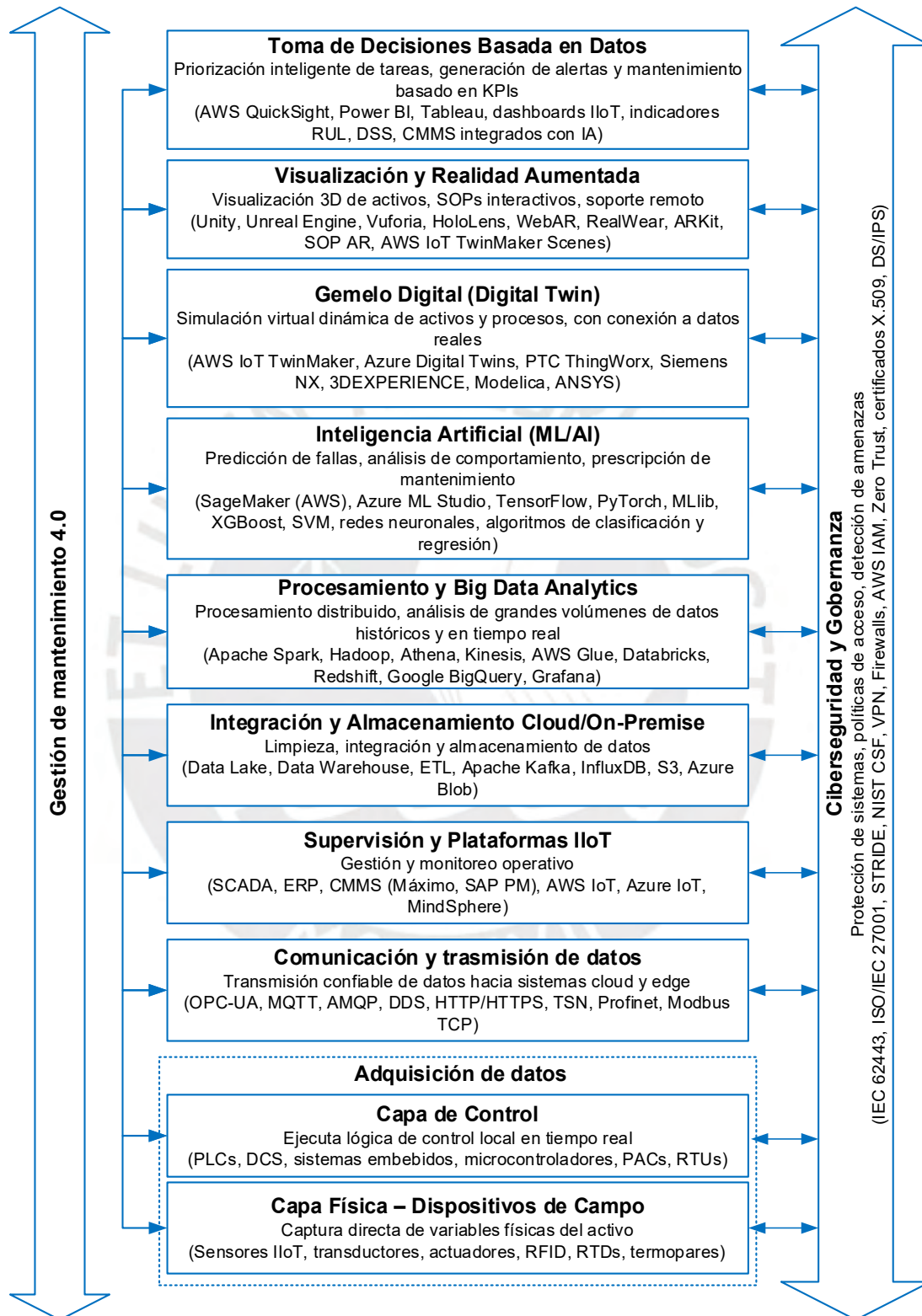
Los sensores IoT recopilan datos continuamente y los transmiten a la plataforma en la nube (Essalih et al., 2025)

Según Ahmed Murtaza et al. (2024a), el Internet de las Cosas (IoT) potencia el mantenimiento predictivo al habilitar la monitorización continua y en tiempo real de equipos industriales. A través de sensores conectados, se capturan variables críticas como vibración, temperatura o corriente, lo que permite detectar anomalías, predecir fallos y estimar la vida útil. Aplicaciones en sectores como energía, manufactura y minería demuestran que la integración de IoT con algoritmos inteligentes mejora la toma de decisiones, reduce el tiempo de inactividad y optimiza los recursos, consolidando al IoT como eje tecnológico clave en estrategias de mantenimiento basadas en datos.

Lucantoni et al. (2025) estructuran la capa de adquisición de datos como la base fundamental de una arquitectura de Mantenimiento Productivo Total (TPM) basada en datos, donde se integran sensores inteligentes, PLCs, sistemas Manufacturing Execution System (MES) y Product Lifecycle Management (PLM), con un CMMS para registrar, gestionar y transformar datos operacionales en indicadores clave de rendimiento. Esta capa garantiza la trazabilidad, estandarización y calidad de los datos, lo que permite una gestión más informada y predictiva del mantenimiento.

Figura E1

Arquitectura funcional del SGM 4.0 para la toma de decisiones basada en datos



Nota. Elaboración propia

2. Adquisición y transmisión de datos

Los sensores IoT recopilan datos continuamente y los transmiten a la plataforma en la nube (Essalih et al., 2025)

Según Ahmed Murtaza et al. (2024a), el Internet de las Cosas (IoT) potencia el mantenimiento predictivo al habilitar la monitorización continua y en tiempo real de equipos industriales. A través de sensores conectados, se capturan variables críticas como vibración, temperatura o corriente, lo que permite detectar anomalías, predecir fallos y estimar la vida útil. Aplicaciones en sectores como energía, manufactura y minería demuestran que la integración de IoT con algoritmos inteligentes mejora la toma de decisiones, reduce el tiempo de inactividad y optimiza los recursos, consolidando al IoT como eje tecnológico clave en estrategias de mantenimiento basadas en datos.

Lucantoni et al. (2025) estructuran la capa de adquisición de datos como la base fundamental de una arquitectura de Mantenimiento Productivo Total (TPM) basada en datos, donde se integran sensores inteligentes, PLCs, sistemas Manufacturing Execution System (MES) y Product Lifecycle Management (PLM), con un CMMS para registrar, gestionar y transformar datos operacionales en indicadores clave de rendimiento. Esta capa garantiza la trazabilidad, estandarización y calidad de los datos, lo que permite una gestión más informada y predictiva del mantenimiento.

3. Supervisión y Plataformas IIoT

Esta capa integra sistemas de supervisión operativa (SCADA), plataformas IIoT y soluciones empresariales (ERP, CMMS). Su rol es asegurar el monitoreo continuo, la recolección automática de datos y el control remoto de los activos, proporcionando una vista consolidada y en tiempo real que sustenta decisiones operativas, estrategias de mantenimiento predictivo y mejora continua.

Shaheen y Németh (2022) destacan que, en el contexto de Maintenance 4.0, la integración de sistemas SCADA, ERP y CMMS con tecnologías IIoT y analítica avanzada “promueve el monitoreo en tiempo real de condiciones, mejora la coordinación de tareas de mantenimiento y facilita la supervisión remota”

Además, Compare et al. (2020) subrayan que “las herramientas de supervisión, como los sistemas SCADA, ERP y CMMS, son algunos de los facilitadores más importantes de la Industria 4.0 debido a su influencia sustancial en las operaciones y procesos de mantenimiento”

4. Integración y Almacenamiento Cloud/On-Premise

Esta capa constituye el núcleo de gestión de datos del SGM 4.0, encargándose de la ingesta, limpieza, fusión, transformación y almacenamiento de información procedente de sistemas operativos y fuentes diversas. El objetivo es asegurar que los datos estén disponibles en formatos estructurados y confiables para su uso en análisis predictivo y decisiones de mantenimiento.

Emplea repositorios híbridos on-premise y cloud —como Data Lake (S3, Azure Blob) y Data Warehouse— para escalabilidad, seguridad y gobernanza (Sahal et al., 2020; Kimball, 2004).

5. Procesamiento y Big Data Analytics

Essalih et al. (2025) destacan que el análisis de Big Data permite optimizar el mantenimiento predictivo al procesar datos industriales para identificar patrones, detectar anomalías y anticipar fallas. Mediante algoritmos basados en datos históricos, el modelo propuesto genera pronósticos precisos y recomendaciones automatizadas, mejorando la toma de decisiones y reduciendo tiempos de inactividad.

Murtaza et al. (2023) destacan que el análisis de Big Data impulsa el mantenimiento predictivo (PdM) y la monitorización de condiciones (CM) al procesar grandes volúmenes de datos industriales, tanto en tiempo real como históricos. Estas técnicas permiten estimar con mayor precisión la vida útil residual (RUL), detectar fallos tempranos y optimizar decisiones de mantenimiento. Se emplean métodos como lógica difusa, regresión de vectores de soporte y minería de datos en aplicaciones como trenes, parques eólicos, paneles solares y centros de mecanizado. El enfoque mejora la eficiencia operativa, reduce costos y minimiza el tiempo de inactividad, posicionando al Big Data como un pilar clave del PdM inteligente.

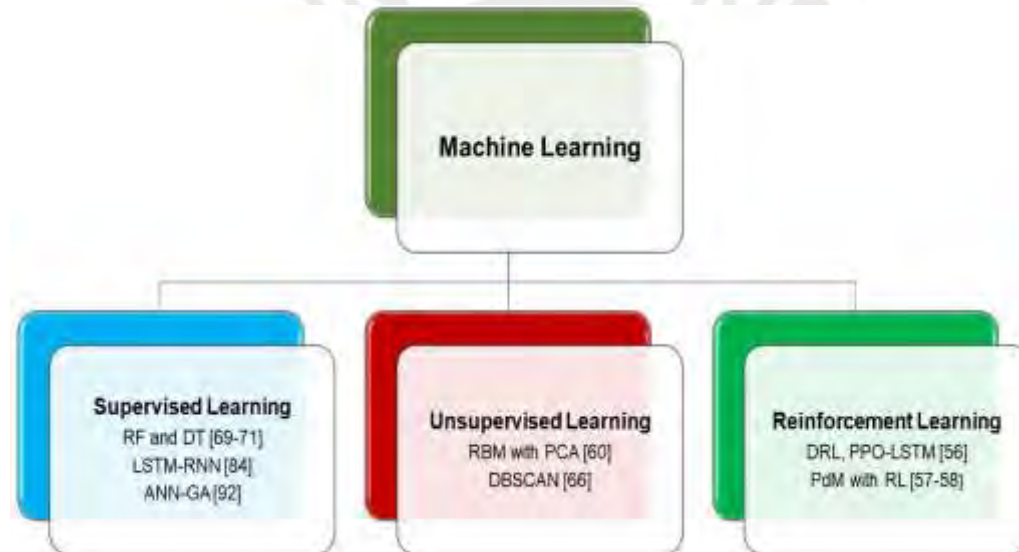
6. Inteligencia Artificial (ML/AI)

Ahmed Murtaza et al. (2024b) destacan el papel fundamental del aprendizaje automático (ML) en la evolución del mantenimiento predictivo (PdM) y la monitorización de condiciones (CM). Se identifican tres enfoques clave: el aprendizaje supervisado, que utiliza datos históricos etiquetados para predecir fallos y estimar la vida útil residual (RUL) como se observa en la figura E2; el no supervisado, orientado a detectar anomalías en datos no etiquetados, útil cuando la información es escasa; y el aprendizaje por refuerzo, que optimiza decisiones en entornos dinámicos mediante

interacción continua con el sistema. Los estudios revisados aplican modelos como CNN, RNN, Random Forest y ARIMA en sectores como aeroespacial, ferroviario, manufactura aditiva y maquinaria rotativa. Además, se integran técnicas como dropout de Monte Carlo, filtrado de partículas y análisis multiescala para mejorar la precisión en la predicción del RUL. Estas soluciones permiten reducir costos de mantenimiento, anticipar fallas y aumentar la disponibilidad operativa. En conjunto, el ML se consolida como una herramienta crítica para una gestión proactiva, automatizada y eficiente de activos físicos, facilitando la transición hacia modelos de mantenimiento inteligente, adaptativo y basado en datos.

Figura E2

Técnicas adaptadas para PdM y CM bajo el paradigma de Machine Learning.



Nota. Fuente Ahmed Murtaza et al., (2024b)

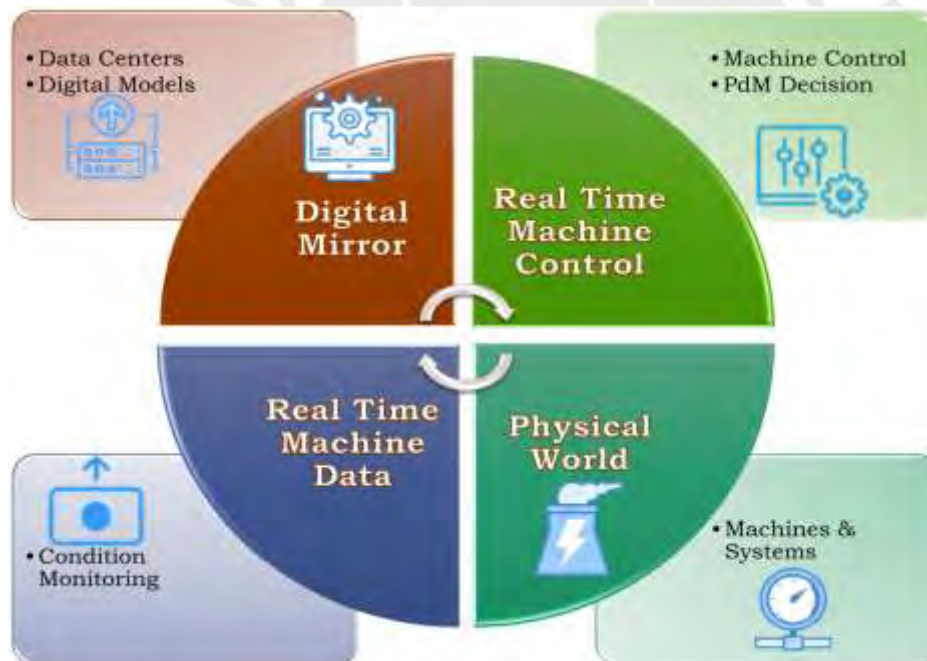
7. Gemelo Digital (Digital Twin)

(Ahmed Murtaza et al., 2024a) proponen que la tecnología de Gemelo Digital (GD) representa un cambio de paradigma en las estrategias de Mantenimiento Predictivo (PdM) y Monitorización de Condición (CM), al permitir una sincronización en tiempo real entre el activo físico y su réplica virtual, como se observa en la figura E3. Esta conexión continua, basada en datos de sensores IoT, posibilita la simulación de fallos, la predicción de la vida útil residual (RUL) y la optimización operativa sin necesidad de detener los equipos. La revisión sistemática realizada por los autores destaca múltiples aplicaciones industriales del GD, incluyendo sistemas basados en simulación para

permitir la monitorización, el pronóstico y el diagnóstico del sistema de frenado automotriz, motores aeronáuticos, robots industriales, turbinas eólicas y grúas, demostrando su versatilidad como herramienta de diagnóstico y pronóstico. Además, se integran modelos basados en física, elementos finitos, redes neuronales como LSTM y GRU, Modelos de Información de Edificios (BIM), lo que refuerza su potencial como plataforma para la toma de decisiones automatizadas. Los Gemelos Digitales no solo aumentan la eficiencia operativa, sino que también promueven la sostenibilidad, al reducir el consumo de recursos y el tiempo de inactividad. El estudio revisa diversos enfoques de implementación, subrayando el potencial del GD para automatizar la toma de decisiones en mantenimiento mediante análisis físicos, estadísticos y datos históricos (Ahmed Murtaza et al., 2024a).

Figura E3

Tecnología Digital Twin para posibilitar PdM y CM



Nota. Fuente Ahmed Murtaza et al.,(2024b)

8. Visualización y Realidad Aumentada

Esta capa emplea tecnologías de visualización 3D e inmersiva, como realidad aumentada (AR) y sistemas de soporte remoto, para presentar información contextual y operativa directamente sobre los activos. Facilita SOPs interactivos, visualización de

Gemelos Digitales y asistencia en tiempo real durante tareas de mantenimiento, mejorando la velocidad, precisión y seguridad de los operarios.

Los técnicos de mantenimiento utilizan dispositivos AR para recibir instrucciones en tiempo real, acceder a documentación digital e interactuar con expertos remotos (Essalih et al., 2025).

La realidad aumentada visualiza elementos digitales superpuestos al entorno real, permitiendo a técnicos recibir instrucciones sin interrumpir su actividad, lo que mejora significativamente la eficiencia de mantenimiento (Kouroush Jenab et al., 2016; Eschen et al., 2017). Además, se reconoce que la AR es una tecnología protagonista de la Industria 4.0, con un importante impacto en productividad, calidad y seguridad laboral (González et al., 2021; Szalavári et al., 2024).

9. Toma de decisiones basada en datos

Esta capa habilita la priorización inteligente de tareas, la generación de alertas y el mantenimiento basado en KPIs, mediante plataformas analíticas, dashboards y sistemas de soporte a decisiones integrados con IA. Su función es transformar datos operacionales en acciones concretas, apoyando decisiones eficientes y alineadas con los objetivos de valor del mantenimiento.

Un estudio sobre plataformas analíticas IoT indica que un flujo “end-to-end” que incluye almacenamiento, procesamiento, visualización y soporte a decisiones permite un mantenimiento predictivo efectivo y una toma de decisiones basada en datos (Sahal, Breslin & Ali, 2020) .

Por otro lado, los sistemas de soporte a decisiones impulsados por Machine Learning mejoran la asignación de prioridad y optimización del mantenimiento, al considerar métricas como RUL (Remaining Useful Life), alertas y contexto operacional (Paraschos, Mollas et al., 2021)

ANEXO F

Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC)

Colli et al., (2019), propone una hoja de ruta de implementación progresiva para un análisis dinámico de modos de fallo, efectos y criticidad (AMFEC), en función de la madurez digital de la organización. El resultado AMFEC consiste en un índice, denominado Número de Prioridad de Riesgo (NPR), lo cual, se calcula, para cada componente del activo, multiplicando las variables de gravedad (S), ocurrencia (O), detectabilidad (D). Cuanto menor sea el NPR, es mejor. Los riesgos se priorizan de mayor a menor según su NPR, y las actividades de mantenimiento relacionadas se planifican en consecuencia. El AMFEC dinámico, basado en la capacidad de actualizar periódicamente la criticidad de los componentes y, por lo tanto, orientar la actualización de los planes de mantenimiento es fundamental para brindar soporte actualizado al mantenimiento. Uno de los temas que deben abordarse para allanar el camino hacia una actualización más dinámica del AMFEC es la recopilación, el intercambio y el uso de la información. En este sentido, se ha destacado la importancia de la adopción de un Sistema Informatizado de Gestión de Mantenimiento (CMMS) para la gestión de activos y, más específicamente, para la gestión de la información relacionada con las actividades de mantenimiento. El papel del CMMS en la gestión del mantenimiento será aún mayor en el futuro, debido al crecimiento de los datos y, por consiguiente, a la necesidad de gestión de la información. La implementación de un AMFEC dinámico se basa en una mayor integración desde la perspectiva de los sistemas de información, ya que su concepto está estrechamente vinculado a la disponibilidad de la información y la automatización de los procesos de negocio. Esto busca generar transparencia en la información y facilitar su uso, tanto en los activos que deben mantenerse como en quienes deben hacerlo. Esta tarea se apoya en las nuevas tecnologías digitales, en particular el Internet de las Cosas (IoT), que permiten lograr la transparencia de la información. Se proponen tres etapas de implementación secuencial de AMFEC dinámico (manual, asistido y autónomo), pensados para funcionar sobre el CMMS existente y respaldados por una creciente madurez digital (y de las capacidades relacionadas) y caracterizados por un nivel creciente de automatización de los procesos AMFEC. La capacidad del CMMS para actualizar el AMFEC depende en gran medida de la interpretabilidad de los datos y de su interpretación. Esta interpretabilidad es consecuencia de la forma en que se recopilan, estructuran y elaboran.

El AMFEC es una de las primeras técnicas de análisis de fallos. Se trata de un enfoque de diseño que utiliza lógica inductiva para comprobar la fiabilidad y la seguridad de los equipos y analizar sistemáticamente los posibles modos de fallo de las piezas del proceso o producto. El AMFEC se utiliza junto con la monitorización de condiciones para evaluar la criticidad del sistema. SE utiliza para destacar y, más específicamente, definir los elementos de los sistemas con el fin de encontrar los factores más adecuados para su análisis y monitorización, de modo que se pueda implementar eficazmente una estrategia de mantenimiento predictivo (Ahmed et al., 2021)

Según (Ahmed et al., 2021), la aplicación de AMFEC es una herramienta muy flexible, pero se caracteriza por diversas ventajas, así como desventajas/limitaciones en términos de aplicabilidad, representación de causa y efecto, análisis de riesgos y resolución de problemas. Algunas de estas ventajas se describen a continuación.

- Facilita la identificación de las causas subyacentes de los fallos y el desarrollo de medidas correctivas.
- Ayuda a identificar los modos de fallo que pueden comprometer la seguridad operativa y a detectar fallos que pueden tener consecuencias indeseables o graves para el funcionamiento del sistema. •
- Ayuda a reconocer la necesidad de enfoques de diseño rentables para mejorar la confiabilidad, como la selección de productos y la redundancia, al intervenir en las etapas iniciales del proceso de desarrollo.
- Ofrece una manera de evaluar la probabilidad de fallas del sistema y el análisis de criticidad.
- Ayuda a resolver problemas de seguridad y responsabilidad del sistema, así como el incumplimiento normativo, al demostrar que se han reconocido los riesgos previsible.
- Ayuda a clasificar diferentes fallas según el Número de Prioridad de Riesgo (NPR).
- Facilita la implementación de un sistema eficiente de gestión de calidad, monitoreo y control del proceso de producción, y ayuda a seleccionar una política de mantenimiento, proporcionando una base para la programación del mantenimiento.
- Es extremadamente riguroso y receptivo a los métodos de análisis de sistemas de asedio, puede mejorar el diseño, la selección de componentes y la confiabilidad del sistema, y es adecuado para identificar puntos únicos de falla

A pesar de sus numerosas ventajas, el AMFEC presenta importantes debilidades:

- Analiza el impacto de fallos individuales y, por lo tanto, resulta ineficaz a la hora de ofrecer una métrica de la fiabilidad del sistema, a pesar de ser un elemento valioso para la toma de decisiones.
- Se basa en la independencia entre los modos de fallo como hipótesis clave y resulta ineficaz a la hora de representar las relaciones entre diferentes modos de fallo.

- Trata activos complejos, lo que puede resultar extremadamente difícil y consumir mucho tiempo debido a la multiplicidad de modos de fallo a considerar. Además, la cantidad de conocimiento específico del sistema que debe investigarse es enorme, especialmente si tenemos que afrontar una variedad de posibles modos de operación, reparaciones y estrategias de mantenimiento.
- Es esencialmente una táctica reduccionista, y no se tienen debidamente en cuenta las consecuencias de los fallos coexistentes. Las variaciones en el entorno pueden afectar la presunta fiabilidad de los elementos. Además, a menudo se ignoran los errores humanos y las situaciones hostiles y, en general, es imposible solucionar los problemas del sistema.
- Solo es aplicable durante la etapa de diseño y solo se tienen en cuenta los modos de fallo, sin considerar sus relaciones mutuas. Las tasas de fallos no son todas iguales y muchas combinaciones de múltiples elementos culminan en el mismo índice NPR, lo que da lugar a duplicación o incluso a evaluaciones engañosas

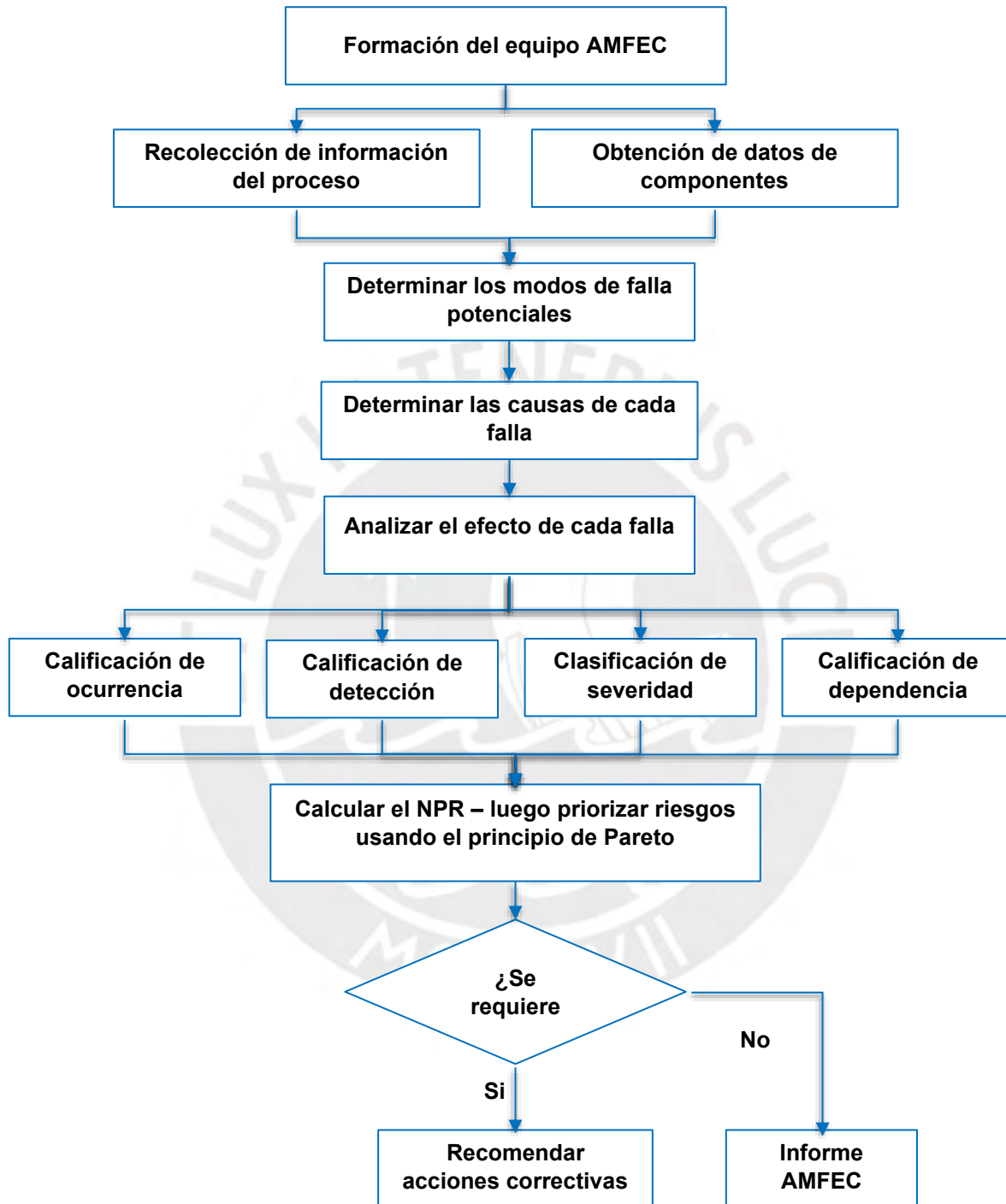
Salah et al., 2023, propone un modelo FMEA utilizando el número de prioridad de riesgo (NPR), que suele ser el producto de tres factores como severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D) incrementando un cuarto factor, la dependencia (D). En la Figura F1 se presenta la implementación sistemática del modelo FMEA. En primer lugar, el equipo de expertos del FMEA se dedica a proporcionar las calificaciones de severidad S, ocurrencia O, detección D y dependencia D2. D2 se añade al FMEA tradicional para determinar la dependencia como cuarta dimensión.

Para calcular el NPR (Número de Prioridad de Riesgo) se utilizó las siguientes escalas de severidad, ocurrencia, detección y dependencia:

- **Severidad (S) o gravedad (G):** que es un valor relativo al efecto de cada fallo, expresado en términos de mantenibilidad, calidad de las piezas producidas y seguridad. Este factor se determina con una escala de calificación del 1 al 10, siendo 10 el valor de mayor gravedad (catastrófica) (Ben Brahim et al., 2019). Ver detalles de la escala en la tabla F1.
- **Ocurrencia (O) o frecuencia (F):** representa la probabilidad de que la causa del fallo aparezca y de que conduzca al modo de fallo potencial considerado. Por lo tanto, es necesario considerar simultáneamente la probabilidad de que la causa aparezca y la probabilidad de que esta conduzca al fallo. El valor de F corresponde a la combinación

Figura F1

Diagrama de implementación sistemáticamente del modelo AMFEC



Nota. Adaptado de (Salah et al., 2023)

de ambas probabilidades. La ocurrencia debe estimarse utilizando una escala de 1 (muy improbable) a 10 (seguro que ocurrirá) (Ben Brahim et al., 2019). Ver detalles de la escala en la tabla F2.

- **Detección (D):** que se refiere a la capacidad de detectar posibles fallos antes de que se materialice el impacto del efecto. Los valores del índice de detección se clasifican en valores inversos de severidad u ocurrencia. La escala va de 1 (Fácilmente detectable) a 10 (Indetectable). Por lo tanto, cuanto mayor sea el valor del índice de detección, menor será la probabilidad de detección (Ben Brahim et al., 2019). Ver detalles de la escala en la tabla F3.
- **Dependencia (D2):** El impacto de una falla de un componente en otros componentes se puede evaluar mediante una escala o un sistema de calificación. Se podría utilizar una escala del 1 al 10, donde 1 indica que la falla no afecta a otros componentes y 10, que la falla tiene un impacto grave en ellos. La escala también podría considerar la criticidad del componente y el efecto de la falla en el sistema general (Salah et al., 2023). Ver detalles de la escala en la tabla F4.

Tabla F1

Escala de severidad

Escala	Efecto	Criterio
1	Ninguno	Sin efecto
2	Muy poco	Muy poco efecto en el desempeño del equipo
3	Poco	Poco efecto en el desempeño del equipo
4	Menor	Efecto menor en el desempeño del equipo
5	Moderado	Efecto moderado en la productividad del equipo
6	Significativo	Efecto significativo en la productividad del equipo
7	Mayor seriamente	El desempeño del artículo se ve afectado, pero es funcional de baja productividad.
8	Extremo inoperable	Equipo opera a un 60% Afecta la operación
9	Serio riesgo de tiempo	Efecto de peligro potencial capaz de descontinuar el equipo, opera al 30%
10	Efecto peligroso, Inoperable mayor gravedad o catastrófica	Falla repentina, equipo inoperativo

Nota. Elaboración propia

Tabla F2

Escala de ocurrencia

Escala	Efecto	Criterio
1	Remota o muy improbable	Falla improbable.
2	Muy poca	Falla aislada por mal manejo de equipo
3	Poca	Falla asociada con el desgaste
4,5,6	Moderada	Fallas ocasionales
7,8	Alta	Fallas recurrentes
9,10	Muy alta o seguro que ocurrirá	Falla inevitable

Nota. Elaboración propia

Tabla F3

Escala de detección

Escala	Efecto	Criterio
1,2	Detectable	Detectado en la inspección rutinaria
3,4	Fácil detectable	Detectado en la inspección preventiva
5,6	Moderada detección	Detectada en campo, pero antes de que ocurra la falla
7,8	Poco detectable	Detectado en medio de la operación
9,10	Indetectable	No detectable hasta que ocurra la falla en campo

Nota. Elaboración propia

Tabla F4

Escala de dependencia

Escala	Efecto	Criterio
1	Ninguno	No afecta ningún otro componente, falla totalmente aislada.
2	Muy poco	No interfiere, pero requiere revisión.
3	Poco	Puede generar alarmas sin consecuencias.
4	Menor	Operación manual momentánea, Falla provoca ajuste local.
5	Moderado	Falla reduce eficiencia de otro componente o aumento de carga o consumo energético.
6	Significativo	Disminuye velocidad o capacidad parcial, limita la operación de un subsistema.
7	Mayor seriamente	Problemas recurrentes en operaciones asociadas, falla genera malfunción en sistemas dependientes
8	Extremo Inoperable	Afecta la producción o sincronización.
9	Serio riesgo de tiempo	Causa paro parcial o total.
10	Efecto Peligroso, Inoperable	Daños múltiples, riesgo grave para el sistema o línea de producción, falla crítica.

Nota. Elaboración propia

El índice de criticidad, denominado NPR (Número de Prioridad de Riesgo) o criticidad (C), se calcula de la siguiente manera:

$$\text{NPR} = \text{Severidad (S)} \times \text{Ocurrencia (O)} \times \text{Detección (D)} \times \text{Dependencia (D2)}$$

En la Figura F2 se presenta un ejemplo de una matriz de Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC).

Figura F2

Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidad (AMFEC)

N°	Componente/ pieza/ operación/ fase	Función	Modo/s potencial/es de fallo	Efecto/s potencial/es del fallo	Gravedad	Dependencia	Causa(s) potencial(es) del fallo(s)	Ocurrencia	Verificación (es) y/o control(es) actual(es)	Detección	NPR	Acción(es) recomendada(s)	Área(s) / persona(s) responsable(s) y fecha de realización	Resultado de las acciones					
														Acciones realizadas	Gravedad	Dependencia	Ocurrencia	Detección	NPR
1	Sensores IIoT	Monitorear condiciones operativas	Fallo en transmisión de datos	No se reciben datos en el sistema predictivo	8	7	Desgaste del sensor, interferencia, red inestable	6	Control de señal y mantenimiento periódico	6	2016	Implementar redundancia en sensores críticos y usar red mesh	Ingeniería & Mantenimiento / 2026-01-101	Red instalada	4	3	3	3	108
2	Análisis Big Data	Detectar patrones de fallo	Falsos positivos o negativos	Diagnóstico erróneo	7	6	Modelo mal entrenado	5	Validación estadística y limpieza de datos	7	1470	Mejorar dataset y reentrenar modelo	Ingeniería & Mantenimiento y TI / 2026-01-101	Modelo actualizado	3	2	3	2	36
3	Red de Comunicaciones OPC UA	Transmisión de datos entre sistemas	Corte de comunicación	Desincronización de órdenes de trabajo	9	8	Sobrecarga, ataque cibernético, fallos físicos	4	Firewall y segmentación de red	5	1440	Red redundante, firewall industrial	Ingeniería & Mantenimiento / 2026-01-101	Firewall instalado	4	3	2	2	48
4	Plataforma Cloud CMMS	Gestión remota de órdenes	Caída del sistema o latencia	No se emiten órdenes de trabajo	8	6	Caída de servidores cloud, mala conexión	5	Backup local y replicación	6	1440	Arquitectura híbrida y contrato Service Level Agreement (SLA)	TI / 2026-01-101	Backup implementado	4	2	3	2	48
5	Gemelo Digital	Simulación de condiciones del equipo	Desalineación del modelo	Diagnóstico incorrecto	7	6	Sincronización deficiente	4	Actualización manual	6	1008	Automatizar actualización con datos reales	Ingeniería & Mantenimiento, TI / 2026-01-101	Integración aplicada	3	2	2	2	24
6	Dispositivo de Realidad Aumentada (RA)	Asistencia visual en campo	Desactualización del contenido	Instrucciones erróneas para el técnico	6	5	Falta de actualización digital	5	Control de versiones manual	6	900	Automatizar actualización desde CMMS	Ingeniería & Mantenimiento, TI / 2026-01-101	Sistema sincronizado	3	2	2	2	24
7	Plataforma de IA Predictiva	Predicción de fallos	Fallo en la predicción o sesgo	Fallo inesperado del activo	8	7	Datos insuficientes o sesgados	6	Validación interna periódica	6	2016	Auditoría de modelo y mejor dataset	Ingeniería & Mantenimiento / 2026-01-101	Modelo auditado	4	2	3	2	48
8	Sistema de Ciberseguridad	Proteger sistemas digitales	Intrusión o sabotaje	Modificación de datos críticos	10	8	Falta de segmentación o protocolos	4	Firewall y autenticación básica	6	1920	Aplicar IEC 62443 y MFA	TI / 2026-01-101	IEC 62443 aplicado	5	3	2	2	60
9	Interfaz HMI conectada a nube	Visualizar condiciones del sistema	Pérdida de conexión o error de visualización	Operador actúa sin información	7	6	Error de red, actualización	5	Control de red, validación de firmware	6	1260	Validación de firmware y backup local	Ingeniería & Mantenimiento, TI / 2026-01-101	Validación realizada	3	2	2	2	24
10	Sistema de Evaluación de KPIs	Analizar desempeño de mantenimiento	Datos inconsistentes	Mala toma de decisiones	6	5	Falta de integración de fuentes	4	Análisis manual	5	600	Automatizar recolección desde GMAO	Ingeniería & Mantenimiento/ 2026-01-101	Automatización completada	2	2	2	2	16

Nota. Elaboración propia

ANEXO G

Análisis de criticidad de activos con la metodología de Jack Knife y dispersión de costos

El diagrama Jack-Knife (JKD), una herramienta que utiliza un gráfico de dispersión logarítmico para analizar simultáneamente tres indicadores clave de desempeño: frecuencia de fallas, tiempo de reparación (MTTR) e indisponibilidad. El JKD permite clasificar las fallas en agudas y crónicas, facilitando la identificación de problemas en inspecciones, disponibilidad de recursos, mantenimiento preventivo, operación del equipo y calidad de materiales.

Para aplicar la metodología de Jack Knife se requiere los siguientes:

- Adquisición de datos como: Identificación del activo (nombre), total de paradas, Tiempo de uso (Real o teórico), Tiempo para reparar (TTR acumulado).
- Evaluación: MTTR, MTBF, Tasa de Fallas [$1/MTBF$] y No Disponibilidad y Disponibilidad
- Evaluar promedios y grafico: Los promedios se evalúan como si todos los datos correspondieran a una sola máquina y realizar el diagrama

En la figura G1 se presenta el cálculo de criticidad con el método de Jack Knife.

En la figura G2 se observa el diagrama de dispersión logarítmica resultante clasifica las fallas en cuatro cuadrantes:

- Fallas agudas y crónicas: problemas frecuentes que generan tiempos de inactividad elevados y requieren atención urgente
- Fallos agudos: eventos raros, pero de alto impacto
- Fallas crónicas: eventos frecuentes con poco tiempo de inactividad que interrumpen las operaciones
- Zona ideal: fallas de baja frecuencia y bajo impacto (el objetivo para todos los activos)

Los JKD no son estáticos; evolucionan con nuevos datos. Las empresas pueden ajustar los límites de fallos crónicos y agudos con el tiempo o fijarlos para monitorizar las mejoras de fiabilidad a largo plazo

Figura G1

Cálculo de criticidad con el método de Jack Knife

Equipo, Sistema o componente	Tasa de fallas 1/MTBF	MTTR	Indisponibilidad	Conclusión	Iso-Tasa	
					x	y
M001-1	0.00214	1.30	0.28%	0	x	y
M001-2	0.00070	14.40	1.01%	0	0.002	0.0001
M001-3	0.00033	7.60	0.25%	0	0.002	10000
M001-4	0.00763	1.00	0.76%	0	Iso-MTTR	
M001-5	0.00070	47.70	3.34%	0	x	y
M001-6	0.00198	36.20	7.15%	Alta Ind. - MTTR	0.0001	20.145
M001-7	0.00161	32.10	5.15%	Alta Ind. - MTTR	1	20.145
M001-8	0.00078	5.50	0.43%	0	Iso-Ind	
M001-9	0.00058	1.80	0.10%	0	x	y
M001-10	0.00214	66.40	14.22%	Alta Ind. - MTTR	0.0001	438.289992
M001-11	0.00535	7.60	4.06%	0	1	0.043829
	0.002176	20.15	4.38%			

Nota: elaboración propia

Figura G2

Diagrama Jack-Knife (JKD)



Nota. Elaboración propia

El Diagrama de Dispersión de Costos (DDC) es una herramienta gráfica utilizada en el análisis de criticidad económica de activos físicos. Permite visualizar y comparar el impacto económico de los equipos, sistemas o componentes en función de su costo asociado a las fallas, tiempo de reparación e indisponibilidad operativa.

Para aplicar la metodología de DDC se requiere los siguientes datos de entrada:

- Costo por hora de intervención (USD/h)
- Tasa de fallas (1/MTBF)
- MTTR
- Indisponibilidad
- Costo específico = Costo × MTTR × Tasa de fallas
- Costo global = Costo específico × Indisponibilidad

En la figura G3 se presenta el cálculo de criticidad con el método de dispersión de costos

En la figura G4 se observa un diagrama de DDC, y se interpreta que en la zona superior derecha están los activos más críticos económicamente (alto costo y alta indisponibilidad) y en la zona inferior izquierda están los activos de baja criticidad económica. Este diagrama es útil para identificar activos con alto costo de mantenimiento no programado, justificar acciones correctivas, rediseños o reemplazos. También permite tomar decisiones de inversión basadas en impacto económico real o priorizar recursos del mantenimiento predictivo o preventivo.

El diagrama de Pareto, es una herramienta visual y analítica esencial para la priorización de activos en mantenimiento. Se basa en el principio de Pareto (80/20), es decir, el 80% del impacto suele estar concentrado en el 20% de los elementos. En la figura G5 se observa un diagrama de Pareto y es un foco estratégico en los activos de mayor peso para optimización de recursos.

Figura G3

Cálculo de diagrama de dispersión de costos (DDC)

Equipo, Sistema o componente	Costo por hora de intervención	Tasa de fallas	MTTR	Indisponibilidad	Costo específico	Costo global	Iso-Ind	
M001-1	63.2153	0.0021	1.3	0.28%	82.2	0.18	x	y
M001-2	45.9803	0.0007	14.4	1.01%	662.1	0.46	0.033	0.0001
M001-3	23.8767	0.0003	7.6	0.25%	181.5	0.06	0.033	1000000
M001-4	13.1490	0.0076	1.0	0.76%	13.1	0.10	Iso-Cge	
M001-5	9.2429	0.0007	47.7	3.34%	440.9	0.31	x	y
M001-6	6.6453	0.0020	36.2	7.15%	240.6	0.48	0.0001	173.599
M001-7	5.5653	0.0016	32.1	5.15%	178.6	0.29	1	173.599
M001-8	4.5727	0.0008	5.5	0.43%	25.2	0.02	Iso-Cgt	
M001-9	2.9003	0.0006	1.8	0.10%	5.2	0.00	x	y
M001-10	1.0984	0.0021	66.4	14.22%	72.9	0.16	0.0001	58014.589
M001-11	0.9592	0.0053	7.6	4.06%	7.3	0.04	1	5.801
				3.34%	173.60	5.80		

Nota. Elaboración propia

ANEXO H

Política del SGM 4.0

A continuación, se presenta un modelo la política del SGM 4.0 alineado a la norma ISO 55001:2024

POLÍTICA DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO 4.0

Somos una organización comprometida con la excelencia operativa y la gestión eficiente de nuestros activos físicos, a través de la implementación de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, alineado con la estrategia organizacional, las mejores prácticas internacionales y generación sostenible de valor a lo largo del ciclo de vida de sus activos físicos

Nuestros compromisos se resumen en lo siguiente:

- Alinear el mantenimiento con los objetivos estratégicos objetivos organizacionales, maximizando la disponibilidad, confiabilidad y valor de los activos físicos mediante tecnologías habilitadoras de la industria 4.0
- Integrar el sistema de mantenimiento 4.0 con otros sistemas de gestión organizacional (calidad, seguridad, medio ambiente y riesgos), asegurando coherencia con la estrategia organizacional y una alineación vertical y horizontal en todos los niveles de la organización.
- Cumplir con los requisitos legales, normativos y contractuales aplicables a la gestión de activos físicos, así como con los compromisos adquiridos con nuestras partes interesadas.
- Fomentar una cultura de mejora continua en la gestión de activos, desarrollando las competencias del personal técnico y profesional, promoviendo la formación especializada en herramientas de análisis predictivo, confiabilidad, ciberseguridad industrial y sostenibilidad del mantenimiento.
- Monitorear, evaluar y mejorar continuamente el desempeño del sistema mediante indicadores clave (OEE, MTBF, MTTR y RUL, disponibilidad, costos de ciclo de vida)

Para lograr estos compromisos, la alta dirección asume la responsabilidad la alta dirección de comunicar y asegurará su disponibilidad como información documentada para las partes interesadas y revisar periódicamente para asegurar su vigencia y coherencia con el contexto organizacional.

[Firma]

Representante de la alta dirección

[Fecha de emisión]

ANEXO I

Análisis de riesgos y oportunidades en el SGM 4.0

Figura I1

Análisis de riesgos y oportunidades en el SGM 4.0

ANÁLISIS DE RIESGOS Y OPORTUNIDADES										Pag: 1 de 1 Código: SGM-IM-01 Versión: 01 Fecha: 01.07.2025
ELABORADO POR:			REVISADO POR:				APROBADO POR:			
Categorías	Descripción del Riesgo u Oportunidad	R/O	Efecto Potencial del Riesgo u Oportunidad	Severidad (S)	Causa Potencial del Riesgo u Oportunidad	Ocurrencia (C)	Controles Actuales (Existentes)	Detección (D)	Nivel de Prioridad del Riesgo (NPR) S*O*D	Acciones Recomendadas
Tecnología y Automatización	Falta de interoperabilidad entre nuevos sensores y sistemas existentes	R	Retrasos en la integración tecnológica y baja eficiencia operativa	8	Uso de tecnologías incompatibles	6	Evaluaciones técnicas puntuales y parches de integración	6	288	Estandarizar protocolos de comunicación (OPC UA, MQTT); adquirir dispositivos compatibles
Adquisición y Gestión de Datos	Implementación de Big Data Analytics para mantenimiento predictivo	O	Reducción de fallas y costos de mantenimiento no planificado	7	Disponibilidad de grandes volúmenes de datos sin análisis estructurado	6	Captura parcial de datos desde sistemas CMMS	6	252	Implementar plataformas de análisis con dashboards e IA
Gestión de conocimiento	Personal técnico sin conocimientos en tecnologías digitales habilitadoras de Industria 4.0 (IIoT, ML, Big Data) para potenciar su experiencia y adaptarse a la demanda de mantenimiento predictivo	R	Limitación para implementar mantenimiento predictivo y baja adopción de tecnologías 4.0	8	Brechas de competencias digitales, falta de programas de actualización y cultura digital	7	Capacitación operativa convencional sin enfoque digital	6	336	Diseñar e implementar programas de formación en tecnologías habilitadoras 4.0 integrados al plan de desarrollo del talento técnico
Infraestructura Digital	Oportunidad de migrar a una arquitectura híbrida cloud-edge	O	Incremento en la disponibilidad de datos en tiempo real para decisiones operativas	7	Limitaciones en capacidad de procesamiento local actual	4	Procesamiento local básico en PLCs/SCADA	5	140	Evaluar viabilidad técnica y económica para migración a arquitectura híbrida cloud-edge
Cultura Organizacional	Resistencia al cambio por digitalización de procesos de mantenimiento	R	Baja adopción de nuevas tecnologías y fracaso en implementación 4.0	8	Falta de sensibilización y participación del personal técnico	5	Capacitaciones generales no específicas	6	240	Implementar programas de gestión del cambio con enfoque en competencias digitales
Ciberseguridad Industrial	Riesgo de ataques a la red IIoT integrada al sistema de mantenimiento	R	Parálisis de activos críticos y pérdida de datos operativos	9	Falta de segmentación y protección en la red Tecnología Operativa (OT)	4	Firewalls genéricos sin segmentación industrial	6	216	Implementar arquitectura de ciberseguridad Tecnología Operativa (OT) en capas, con monitoreo continuo
Integración Financiera	Falta de alineación entre PEGA y planes financieros	R	Falta de recursos para ejecutar acciones críticas del mantenimiento 4.0	8	Desconexión entre áreas técnicas y financieras	5	Presupuestos históricos no dinámicos	6	240	Integrar PEGAF con plan financiero
Gestión de Proveedores	Dependencia de proveedores únicos para soluciones tecnológicas clave	R	Riesgo de interrupción operativa por fallas externas	7	Falta de estrategia de homologación o contingencia	5	Acuerdos de nivel de servicio no estandarizados	5	175	Desarrollar evaluación multicriterio de proveedores y plan de contingencia tecnológica
Seguridad y Medio Ambiente	Incumplimiento de normativa ambiental y de SST por falta de trazabilidad	R	Sanciones, pérdida de licencia y reputación	8	Ausencia de registros automatizados y sistemas de alerta temprana	6	Auditorías periódicas y registros manuales	5	240	Digitalizar registros de cumplimiento y establecer alarmas IIoT para desvíos
Alta Dirección	Información en tiempo real para decisiones estratégicas basadas en datos	O	Mejora en el logro de objetivos corporativos y aumento del retorno de inversión	9	Falta de dashboards ejecutivos y sistemas de visualización integrados	5	Reportes periódicos no automatizados	4	180	Implementar BI con indicadores clave conectados a plataformas IIoT y CMMS
Ingeniería y Mantenimiento	Reducción de actividades de mantenimiento correctivo o reactivo mediante tecnologías 4.0	O	Incremento en la eficiencia de mantenimiento y mayor confiabilidad operativa	8	Falta de formación técnica y herramientas predictivas adecuadas	6	Uso parcial de mantenimientos preventivos sin análisis de condición	5	240	Capacitar al personal en mantenimiento predictivo y desplegar sensores conectados a IA

Nota. Elaboración propia

Tabla I1*Escala de Severidad (S)*

Índice	Efecto	Severidad del Riesgo en el Proceso	Severidad de la Oportunidad
10	Afecta la Seguridad y Legislación	Riesgo de vida, medio ambiente, incumplimiento legal	Mejoras 100% asegurado en todos los procesos
9	Muy Crítico	Compromete >75% del desempeño, sin recuperación	Mejora en procesos estratégicos, elimina amenaza
8	Crítico	Necesita intervención urgente de Alta Dirección	Mejora operativa directa de alto impacto
7	Importante	Afecta el 50% del proceso. Exige atención gerencial	Ayuda a superar debilidad importante
6	Significativo	Afecta 25%. Impacto leve, requiere corrección	Mejora en procesos de apoyo
5	Moderado	Afecta hasta 15%. Acción puntual	Mejora oportunidad existente
4	Menor	Impacto leve en partes interesadas o entregas	Mejora menor operativa
3	Bajo	No afecta resultados, pero implica molestias	Mejora marginal en la eficiencia
2	Mínimo	Leve inconveniente, sin consecuencias	Leve mejora sin impacto
1	Nulo	Sin efecto en el desempeño del proceso o por las partes interesadas	Sin mejora significativa

Nota. Elaboración propia

Tabla I2*Escala de Ocurrencia (O)*

Índice	Ocurrencia	Probabilidad de la Causa
10	Muy Alta	>1 en 10
9	Alta	1 en 20
8	Moderada Alta	1 en 50
7	Moderada	1 en 100
6	Media	1 en 500
5	Baja Moderada	1 en 2,000
4	Baja	1 en 10,000
3	Muy Baja	1 en 100,000
2	Remota	1 en 1'000,000
1	Casi imposible	Nunca ha ocurrido

Nota. Elaboración propia

Tabla I3*Escala de Detección (D)*

Indice	Detección	Probabilidad de Detectar
10	Casi imposible	No hay forma de detectar a tiempo
9	Muy remota	Sin método de detección viable
8	Remota	Detección ineficaz o incierta
7	Muy baja	Baja confiabilidad en detección
6	Baja	Métodos con eficacia limitada
5	Media	Eficiencia aceptable en detección
4	Alta	Alta eficiencia y detección constante
3	Muy alta	Detección casi siempre exitosa
2	Casi garantizada	Detección automática y oportuna
1	Garantizada	Detección automática en tiempo real (IoT + IA)

Nota. Elaboración propia

Tabla I4*Nivel de Prioridad del Riesgo (NPR)*

NPR	Nivel de Tratamiento	Acción Recomendable
250 – 1000	Alto	Intervención inmediata con rediseño, inversión o eliminación del riesgo
125 – 249	Medio	Control mediante objetivos y mejora continua dentro del SGM
< 125	Bajo	Seguimiento rutinario. Se gestiona dentro del control normal del proceso

Nota. Elaboración propia. $NPR=S \times O \times D$

ANEXO J
Objetivos del SGM 4.0

Figura J1

Tablero de objetivos del SGM 4.0

OBJETIVOS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO 4.0										Pag: 1 de 1 Código: SGM-IM-01 Versión: 01 Fecha: 01.07.2025		
ELABORADO POR:			REVISADO POR:				APROBADO POR:					
PERSPECTIVA	N°	OBJETIVO	INDICADOR	META	UNIDAD DE MEDIDA	RESPONSABLE	PLAZO DE CUMPLIMIENTO	FRECUENCIA DE SEGUIMIENTO	RECURSOS	BUENO	REGULAR	MALO
GESTIÓN DE MANTENIMIENTO Y EFICIENCIA OPERATIVA	1	Incrementar el OEE en líneas críticas de producción	OEE promedio mensual	>=85%	%	Coordinador de Producción	6 meses	Mensual	Dashboard OEE, Sistemas de monitoreo	>=85%	75-84%	<75%
	2	Aumentar la disponibilidad de equipos críticos	Índice de disponibilidad	>=95%	%	Ingeniería & Mantenimiento y TI	12 meses	Mensual	CMMS, plan de mantenimiento, técnicos	>=95%	85-94%	<85%
	3	Reducir el tiempo medio entre paradas de las líneas productivas	Tiempo medio entre paradas (MTBS)	>=30 días	Días	Ingeniería & Mantenimiento y TI	9 meses	Mensual	Historial de paradas, análisis de causa raíz	>=30d	20-29d	<20d
	4	Aumentar el tiempo entre fallas en equipos críticos	Tiempo medio entre fallas (MTBF)	> 200 h	h	Ingeniería & Mantenimiento y TI	Mensual	Mensual	CMMS, Historian	> 200	150-200	< 150
	5	Disminuir el tiempo medio de reparación	Tiempo medio de reparaciones (MTTR)	≤ 4 h	Horas	Ingeniería & Mantenimiento y TI	Trimestral	Mensual	CMMS, Técnicos	≤ 4	5	> 6
	6	Reducir la proporción de intervenciones de mantenimiento correctivo	% de intervenciones correctivas sobre el total	<=20%	%	Ingeniería & Mantenimiento y TI	6 meses	Mensual	CMMS, historial de fallas, análisis de causa raíz	<=20%	21-30%	>30%
	7	Optimizar las órdenes de trabajo en el CMMS	% de OT digitalizadas y ejecutadas	100%	%	Ingeniería & Mantenimiento y TI	6 meses	Mensual	Sistema CMMS, personal capacitado	100%	80-99%	<80%
ADQUISICIÓN, GESTIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	8	Adquirir datos en tiempo real de variables críticas como vibración, temperatura y consumo energético	% de activos monitoreados en tiempo real	>=90%	%	Ingeniería & Mantenimiento y TI	6 meses	Mensual	Sensores IoT, SCADA, Edge Gateways, CMMS	>=90%	70-89%	<70%
	9	Centralizar y visualizar KPIs en una plataforma de monitoreo	Número de KPIs automatizados en dashboards	20	N° de KPIs	Ingeniería & Mantenimiento y TI	6 meses	Mensual	Plataforma de visualización, Licencias, Personal de TI	>=20	10-19	<10
	10	Aplicar modelos predictivos basados en ML	Número de modelos ML implementados	5	N° de modelos	Ingeniería & Mantenimiento y TI	8 meses	Mensual	ML Toolkit, Datos históricos, Infraestructura cloud	>=5	3-4	<3
	11	Implementar visualización de indicadores como OEE, MTBF, MTBS y MTTR por línea de producción	Porcentaje de líneas con OEE, MTBF, MTBS y MTRR visualizado	100%	%	Ingeniería & Mantenimiento y TI	5 meses	Mensual	Sistema SCADA, Sistema CMMS, Dashboard, Analítica, Algoritmos de detección	100%	80-99%	<80%

CIBERSEGURIDAD E INFRAESTRUCTURA TIC	12	Asegurar los sistemas críticos de mantenimiento ante amenazas cibernéticas	Nº de incidentes de ciberseguridad en sistemas críticos	0	Nº de incidentes	Ingeniería & Mantenimiento y TI	Continuo	Mensual	Firewall, IDS/IPS, Consultoría especializada	0	1	>1
CONECTIVIDAD E INTEROPERABILIDAD	13	Interconectar los sistemas como CMMS, ERP, MES, SCADA y plataformas de análisis	Nivel de interoperabilidad entre sistemas	100%	%	Ingeniería & Mantenimiento y TI	Anual	Trimestral	Middleware, APIs, Consultoría IT	100%	80-99%	<80%
CULTURA ORGANIZACIONAL Y DESARROLLO DE COMPETENCIAS	14	Elevar el nivel de competencias digitales del personal de mantenimiento	% del personal con dominio de TIC y tecnologías 4.0	>=90%	%	RR.HH, Ingeniería & Mantenimiento y TI	12 meses	Trimestral	Diagnósticos digitales, evaluaciones por competencias	>=90%	70-89%	<70%
	15	Establecer un programa anual de capacitación en tecnologías emergentes 4.0	% de cumplimiento del programa anual de formación	100%	%	RR.HH, Ingeniería & Mantenimiento y TI	Anual	Trimestral	Capacitaciones, instructores especializados	100%	80-99%	<80%
	16	Medir la actitud del personal frente a la transformación digital	% de aceptación al cambio	>=80%	%	RR.HH, Ingeniería & Mantenimiento y TI	6 meses	Trimestral	Encuestas, entrevistas	>=80%	60-79%	<60%
ESTRATEGIA DIGITAL Y LIDERAZGO	17	Integrar PEGA con iniciativas de mantenimiento 4.0	% de cumplimiento del Plan Estratégico	100%	%	Gerente de Activos, Ingeniería & Mantenimiento	12 meses	Trimestral	Equipo PEGA, software de planificación	100%	80-99%	<80%
	18	Asignar presupuesto específico a proyectos 4.0	% del presupuesto destinado	>=10%	%	Alta Dirección, Gerente de Activos, Ingeniería & Mantenimiento	Anual	Anual	Presupuesto institucional, plan de inversión	>=10%	5-9%	<5%
SOSTENIBILIDAD, ENERGÍA Y SSOMA	19	Aumentar la eficiencia energética en la operación de activos	% de ahorro energético	10%	%	Ingeniería & Mantenimiento	9 meses	Mensual	Auditoría energética, sensores de energía	>=10%	5-9%	<5%
	20	Evitar exposición a materiales peligrosos o radiación ionizante de trabajadores	Nº de incidentes por exposición ocupacional	0	Incidentes	SSOMA y Ingeniería & Mantenimiento	Continuo	Mensual	EPP, sensores de exposición, formación especializada	0	1	>1
TECNOLOGÍA Y AUTOMATIZACIÓN	21	Implementar tecnologías IIoT para automatizar el monitoreo de activos críticos	% de activos críticos con sensores IIoT instalados	90%	%	Ingeniería & Mantenimiento	12 meses	Mensual	Sensores, Gateways, Software IIoT	>=90%	70-89%	<70%
	22	Implementar Gemelos Digitales para simular, representar en tiempo real y optimizar decisiones sobre activos críticos	% de activos con gemelo digital	50%	%	Ingeniería & Mantenimiento	12 meses	Trimestral	Modelado 3D, Sensores, Plataforma Digital Twin	>=50%	30-49%	<30%
FINANCIERA	23	Reducir costos de mantenimiento	Costo total de mantenimiento	10%	%	Finanzas, Ingeniería & Mantenimiento	Anual	Trimestral	ERP + CMMS	<=10%	10%-15%	>15%
	24	Reducir el OPEX en la gestión de activos	% de reducción del OPEX anual	10%	%	Finanzas, Ingeniería & Mantenimiento	12 meses	Anual	Análisis de TCO, informes de costos, auditorías	>=10%	5-9%	<5%
LOGISTICA DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE SUMINISTROS	25	Garantizar la disponibilidad de repuestos críticos para activos de alta prioridad	% de repuestos críticos disponibles en inventario	>=98%	%	Logística & Abastecimiento	6 meses	Mensual	Sistema CMMS, clasificación ABC, políticas de stock	>=98%	85-97%	<85%
	26	Reducir el tiempo promedio de adquisición de bienes y servicios de mantenimiento	Lead time promedio de compras	<=7 días	Días	Logística & Abastecimiento	5 meses	Mensual	Sistema ERP, acuerdos marco con proveedores	<=7d	8-10d	<=7d

Nota. Elaboración propia

ANEXO K

Plan Estratégico de Gestión de Activos Físicos (PEGAF) integrando el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0

1. Resumen ejecutivo

El Plan Estratégico de Gestión de Activos Físicos (PEGAF) con enfoque en el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) establece una hoja de ruta integral para maximizar el valor de los activos físicos críticos a lo largo de su ciclo de vida, mediante la integración de tecnologías digitales, analítica avanzada y un modelo de gestión basado en datos. Este plan traduce la estrategia corporativa en acciones concretas orientadas a maximizar el valor generado por los activos físicos críticos, asegurando su disponibilidad, confiabilidad, sostenibilidad y alineación con los objetivos institucionales.

Desarrollado conforme a los principios de la norma ISO 55001:2024, el PEGAF identifica y prioriza los activos más críticos, analiza riesgos y oportunidades, define objetivos SMART vinculados a indicadores de desempeño (KPI) y consolida la cultura organizacional hacia la transformación digital. Además, incorpora procesos de soporte como logística inteligente, compras digitalizadas, gestión del conocimiento, ciberseguridad y uso de tecnologías habilitadoras (IoT, IA, Gemelos Digitales, realidad aumentada, entre otros)

A través del PEGAF con enfoque en Mantenimiento 4.0, la organización no solo moderniza su infraestructura operativa, sino que evoluciona hacia un modelo de gestión inteligente de activos, resiliente, sostenible y competitivo, que posiciona al mantenimiento como motor clave en la creación de valor a largo plazo.

2. Descripción general

2.1 Propósito

El propósito del PEGAF integrando el SGM 4.0 es garantizar la gestión eficiente, confiable y sostenible de los activos físicos críticos de la organización, a través de un modelo de mantenimiento 4.0, predictivo y basado en datos, que permita maximizar su valor a lo largo de todo el ciclo de vida, alineado con los objetivos estratégicos, operacionales y financieros de la organización.

Este propósito se materializa mediante la aplicación de las mejores prácticas internacionales en gestión de activos físicos, el cumplimiento de los requisitos de la norma ISO 55001:2024 y la incorporación de tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0, como herramientas clave para mejorar la toma de decisiones, aumentar la disponibilidad de activos, reducir fallas no planificadas y optimizar el uso de los recursos técnicos y económicos.

2.2 Alcance

El PEGAF abarca la gestión estratégica de todos los activos físicos críticos de la organización, aquellos que impactan significativamente en la confiabilidad, seguridad,

continuidad operativa y sostenibilidad del negocio, a lo largo de todo su ciclo de vida: planificación, adquisición, operación, mantenimiento y disposición final.

El plan incluye la integración de un Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, sustentado en una arquitectura tecnológica que incorpora sensores inteligentes (IIoT), SCADA, sistemas de gestión de mantenimiento (CMMS), plataformas cloud, ERP, inteligencia artificial, machine learning, realidad aumentada y Gemelos Digitales. También contempla los procesos estratégicos, operativos y de soporte asociados, asegurando su alineación con los objetivos organizacionales, los requisitos normativos, y las expectativas de las partes interesadas.

El alcance también cubre la evaluación de desempeño, auditorías internas, revisión gerencial, acciones correctivas y mejora continua, garantizando la evolución progresiva del sistema hacia la excelencia operativa y la transformación digital.

2.3 Responsabilidades

La ejecución del PEGAF requiere un liderazgo coordinado y responsabilidades claramente asignadas entre los distintos niveles de la organización:

- Alta Dirección: Aprueba el PEGAF, asigna recursos y lidera la transformación hacia Mantenimiento 4.0.
- Gerencia de gestión de activos: monitorea el cumplimiento del plan, administra riesgos y consolida información de activos.
- Ingeniería & Mantenimiento: Coordina la implementación del sistema, supervisa indicadores y asegura la integración tecnológica.
- TI: Garantiza la infraestructura digital, integra plataformas (CMMS, SCADA, ERP) y gestiona la ciberseguridad.
- Supervisores y técnicos: Ejecutan estrategias de mantenimiento, aplican AMP y reportan datos operativos en campo.
- Recursos Humanos: gestionar programas de formación en competencias digitales del personal
- Logística y Compras: Asegura la trazabilidad y disponibilidad de repuestos críticos, gestiona proveedores tecnológicos y formaliza contratos alineados con los requisitos del mantenimiento 4.0

2.4 Referencia normativa

- ISO 55001:2024 – Requisitos del sistema de gestión de activos
- ISO 55002:2020 – Directrices para la aplicación de ISO 55001
- UNE-EN 15341:2020 – Indicadores de mantenimiento
- IEC 62443 – Ciberseguridad en sistemas de automatización industrial
- ISO 55001:2024 - Gestión de activos. Sistemas de gestión. Requisitos
- ISO 55002:2020 - Gestión de activos. Sistemas de gestión. Directrices para la aplicación de la Norma ISO 55001
- ISO 31000:2018 - Gestión del riesgo. Directrices
- UNE-EN 15341:2020 - Mantenimiento. Indicadores clave de rendimiento (KPI)
- IEC 62443 - Ciberseguridad en sistemas de automatización industrial

- ISO 9001:2015 - Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos
- ISO 14001:2015 -Sistemas de gestión ambiental. Requisitos
- ISO 45001:2018 - Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo. Requisitos

3. Contexto de la organización

La organización ha identificado sus cuestiones internas y externas que pueden afectar el desempeño del Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0 (SGM 4.0) mediante la matriz de análisis FODA de Activos (SGM-DI-01), en coherencia con su misión, visión y objetivos estratégicos.

Asimismo, se han determinado las partes interesadas relevantes y sus requisitos, a través de la matriz de análisis de partes interesadas (SGM-DI-02), considerando su influencia en la confiabilidad, disponibilidad y sostenibilidad de los activos.

El alcance del PEGAF abarca a todos los activos físicos críticos (SGM-DI-03) de la organización, cubriendo su ciclo de vida completo (desde la planificación hasta la disposición final) y orientando su gestión mediante un Sistema de Mantenimiento 4.0, basado en datos y tecnologías digitales.

Se ha establecido una arquitectura funcional del SGM 4.0 para la toma de decisiones basada en datos (SGM-DI-04) y está compuesta por un conjunto de capas tecnológicas integradas

Se ha establecido un Mapa de Procesos de SGM 4.0 (SGM-DI-05) y se ha definido los procesos estratégicos, operativos y de apoyo

4. Liderazgo

La Alta Dirección de la organización demuestra su compromiso con el Sistema de Gestión de Activos Físicos, en el marco de la transición hacia el SGM 4.0, mediante las siguientes acciones clave:

- Alineación estratégica: Integra el SGM 4.0 con la estrategia organizacional, asegurando que los objetivos de mantenimiento contribuyan al logro de metas corporativas. El Plan Estratégico de Gestión de Activos Físicos (PEGAF) y la política de activos físicos esta alineada a la estrategia digital.
- Asignación de recursos: provee los medios necesarios (tecnología, personal, financiamiento y formación) para implementar tecnologías habilitadoras de industria 4.0
- Política de gestión de activos: establece una política que orienta los objetivos, promueve la mejora continua, asegura el cumplimiento normativo y mantiene coherencia con otras políticas institucionales.
- Definición de roles: asigna responsabilidades claras en todos los niveles, garantizando la competencia del personal y su alineación con los objetivos del sistema.
- Comunicación y participación: promueve la difusión interna del sistema, facilita la comprensión de su propósito y comunica el desempeño a las partes interesadas relevantes.

La Política del SGM 4.0(SGC-DI-06), es la declaración escrita del compromiso de la Alta Dirección en la que se comunica a toda la organización que se tiene la decisión de mantener el esfuerzo para alcanzar la excelencia operativa y la gestión eficiente de los activos físicos, a través de la implementación de un SGM 4.0, alineado con la estrategia organizacional, las mejores prácticas internacionales y generación sostenible de valor a lo largo del ciclo de vida de sus activos físicos.

La organización establece en forma gráfica el Organigrama (SGM-DI-07) que representa las funciones, interrelaciones y/o líneas de reporte de los diferentes puestos del personal, lo cual se refleja en el Manual de Organización y Funciones (RRHH-MA-01)

5. Planificación

Con el fin de lograr los resultados previstos del SGM 4.0 se identifican y abordan los riesgos y oportunidades que podrían afectar el desempeño del sistema. Este análisis se realiza mediante la Matriz de Análisis de Riesgos y Oportunidades (SGM-DI-08).

La organización, a través de la Gerencias y en coordinación con el equipo técnico, ha definido los objetivos del SGM 4.0 (SGM-DI-09) para la toma de decisiones basado en datos que es parte del PEGAF, en el que se establecen para cada uno de los objetivos estratégicos el indicador, meta, unidad de medida, responsable, plazo de cumplimiento, frecuencia de seguimiento, recursos y evaluación de su cumplimiento. Dichos objetivos están alineados con la política del SGM 4.0 y expresan el compromiso de la organización con la mejora continua, la confiabilidad operativa y la toma de decisiones basada en datos.

Se establece el Plan Estratégico de Gestión de Activos Físicos (PEGAF) que integra el SGM 4.0 (SGM-DI-10), cumpliendo con los requisitos de la ISO 55001:2024.

El PEGAF establece la hoja de ruta para maximizar el valor de los activos físicos alineados a los objetivos estratégicos de la organización. Al integrar el Sistema de Gestión de Mantenimiento 4.0, se incorpora una gestión digitalizada, predictiva y basada en datos, orientada al ciclo de vida del activo.

Este modelo combina los principios de la ISO 55001:2024 con tecnologías habilitadoras de la industria 4.0, garantizando trazabilidad, eficiencia operativa y resiliencia. Se estructura en torno a cinco ejes: contexto de la organización, liderazgo, planificación, soporte, operación, evaluación de desempeño y mejora continua.

Asimismo, cuando se planifiquen o implementen cambios en el SGM 4.0 estos serán evaluados previamente en función de su impacto sobre la integridad del sistema, los recursos requeridos y los riesgos asociados. Esta revisión será liderada por la Gerencia General para su aprobación e implementación.

6. Soporte

La organización cuenta con Portafolio de Activos Físicos Críticos (SGM-DI-03), que es un documento estructurado o una base de datos que identifica, clasifica, prioriza y caracteriza aquellos activos físicos cuya disponibilidad, confiabilidad o desempeño impactan de forma significativa en los objetivos estratégicos, operativos, financieros o

de seguridad, además se identifican los recursos actuales (humanos, tecnológicos, financieros) para el mantenimiento de los activos identificados.

La Gerencia General en conjunto con las Gerencias de Gestión de Activo, Gerencia de Mantenimiento y otras gerencias pertinentes detectan las necesidades en materia de recursos, las cuales son posteriormente gestionadas por el Gerente de Finanzas u equivalente, proporcionando los recursos necesarios para implementar y mejorar los procesos del SGM 4.0

La Gerencia General asigna personal competente a las diferentes actividades de Mantenimiento en base a su educación, formación o experiencia laboral que se encuentra en el Manual de Organización y Funciones (RRHH-MA-01).

Con la finalidad de mantener la competencia del personal, los Gerentes y/o Jefes de Área identifican las necesidades de capacitación de su personal, las cuales se plasman en el Plan Anual de Capacitación (RRHH-MA-01). Se cuenta con el Procedimiento de Reclutamiento y Selección del Personal (RRHH-PR-01).

Los Gerentes y Jefes de Área son responsables de hacer cumplir el Plan Anual de Capacitación y mantener los registros de competencia, los que incluyen la evaluación de la eficacia de capacitación, de acuerdo al Procedimiento de Evaluación de la Capacitación del Personal (RRHH-PR-02).

El personal tiene pleno conocimiento de la importancia de las actividades de mantenimiento, mediante el conocimiento, aplicación y compromiso con la política, los objetivos, el plan estratégico y los demás documentos que conforman el Sistema de Gestión de Mantenimiento, así como mediante el conocimiento de sus funciones. El documento asociado es el Procedimiento de Inducción de Personal (RRHH-PR03)

Los Gerentes y/o Jefes de Área aseguran los procesos de comunicación adecuados y apropiados a la organización y al sistema de gestión, para ello se llevan a cabo reuniones, uso de paneles visibles o tableros digitales, uso de medios digitales como dashboards, apps móviles, canales corporativos o sistemas CMMS/ERP.

Es responsabilidad de los Gerentes y/o Jefes de Áreas la difusión al personal bajo su cargo de los objetivos de mantenimiento y del resultado de los indicadores KPI, así como los resultados de las auditorías internas, las acciones tomadas de las sugerencias realizadas y otra información relevante.

Se establecen los mecanismos de comunicación en donde se promueve la mejora continua a través de la participación del personal. Esto se realiza se puede realizar mediante reuniones periódicas de coordinación de las áreas.

Se establece el Procedimiento para el Control de Documentos y Registros (SGM-PR-01) para controlar la información documentada. El control de documentos también debe incluir el control de los documentos de procedencia externa. Así mismo, se debe controlar todos los registros correspondientes de las actividades de mantenimiento, con la finalidad de demostrar su cumplimiento en las auditorías correspondientes.

Se implementa repositorios seguros de información documentada (manuales, reportes, protocolos, evidencia técnica) y se debe establecer políticas de acceso, versiones y respaldo de la información.

7. Operación

La organización ha identificado ha establecido criterios técnicos-operativos de mantenimiento para cada proceso del ciclo de vida del activo (adquisición, mantenimiento, disposición).

Se ha establecido criterios para actividades operacionales y tecnológicas, definiendo parámetros técnicos, condiciones de operación, límites de intervención y requisitos tecnológicos que aseguren la coherencia, eficacia y control de las actividades de mantenimiento. Implementar procesos automatizados y trazables usando plataformas digitales (CMMS, ordenes de trabajo digital, alarmas automáticas, dashboards de KPI, etc.)

Se ha implementado un sistema de gestión del riesgo integrado en el SGM 4.0 (matriz de criticidad, análisis RAMS, FMECA digital, simulación de fallos, etc.)

Se planifican las actividades del mantenimiento priorizando el impacto en el valor generado, los riesgos operacionales y la criticidad del activo, con trazabilidad y medición.

A continuación, se describe los documentos clave planificación y control operacional de sistema de gestión de mantenimiento:

- SGM-DI-11: Plan maestro de mantenimiento 4.0
- SGM-DI-12: Plan de gestión del ciclo de vida de activos físicos y digitales.
- SGM-PR-02: Procedimiento de planificación y programación de mantenimiento
- SGM-DI-13: Plan de Mantenimiento Predictivo (PdM)
- SGM-DI-14: Plan de inspecciones técnicas basadas en condición
- SGM-DI-15: Plan de mantenimiento preventivo
- SGM-DI-16: Programa de Mantenimiento Predictivo (PdM)
- SGM-DI-17: Programa de inspecciones técnicas basadas en condición
- SGM-DI-18: Programa de mantenimiento preventivo
- SGM-PR-03: Procedimiento de ejecución de ordenes de trabajo de mantenimiento
- SGM-IT-01: Instructivo de instalación y calibración de sensores
- SGM-IT-02: Instructivo para la adquisición y transmisión automático de Datos
- SGM-IT-02: Instructivo de configuración y operación del CMMS
- SGM-IT-03: Instructivo de tareas con realidad aumentada
- SGM-IT-04: Instructivo de tareas con digital twins
- SGM-PR-04: Procedimiento para la definición, cálculo y revisión de KPIs
- SGM-PR-05: Procedimiento para identificar, analizar, evaluar y gestión de riesgos
- SGM-DI-19: Manual de ciberseguridad industrial
- SGM-DI-20: Guía para Integración sistemas interoperables de (SCADA, CMMS, ERP, plataformas cloud, sistemas de IA, etc.)
- SGM-DI-21: Guía para Entrenamiento de Modelos de IA/ML
- SGM-RE-01: Registro de Datos de Condición de Activos Físicos
- SGM-RE-02: Registro de Modelos Predictivos Activos
- SGM-RE-03: Registro de Alertas Inteligentes
- SGM-RE-04: Registro de Órdenes de Trabajo
- SGM-RE-05: Registro de KPIs del Mantenimiento 4.0

- SGM-RE-06: Registro de Gemelos Digitales Operativos
- SGM-RE-07: Registro de Cambios Tecnológicos
- SGM-RE-08: Registro de Fallas Detectadas por IA
- SGM-RE-09: Registro de Uso de Realidad Aumentada
- SGM-RE-10: Registro de Análisis y Decisiones Basadas en Datos

La organización debe definir el proceso para gestionar cambios planificados en el sistema de mantenimiento 4.0, asegurando su evaluación, control y documentación, con el fin de minimizar impactos no deseados y maximizar el valor durante el ciclo de vida del activo. El proceso de gestión del cambio contempla la solicitud formal del cambio, seguida por una evaluación que analiza riesgos, impactos y costos. Una vez aprobado por el comité técnico, se procede con una implementación controlada y documentada. Posteriormente, se realiza el seguimiento y revisión de efectos, aplicando acciones de mitigación en caso de consecuencias no deseadas, y dejando constancia en el registro histórico del sistema. El control de cambios se debe documentar en el Procedimiento integral de control de cambios en Mantenimiento 4.0 (SGM-PR-05)

La organización debe evaluar qué procesos conviene tercerizar (según criticidad, competencia y valor estratégico) definiendo su alcance, límites e interfaces con los sistemas internos

La unidad de logística y almacenes debe asegurar la disponibilidad oportuna de repuestos, herramientas y materiales críticos mediante la automatización de procesos logísticos, Los documentos clave para cumplir son:

- LOG-PR-01: Procedimiento de gestión logística y almacenes
- LOG-RE-01: Registro de Repuestos Críticos
- LOG-IT-01: Instructivo de Trazabilidad de Repuestos Críticos

La unidad de Compras y Contrataciones gestiona la adquisición de bienes y servicios técnicos mediante criterios de desempeño, digitalización y sostenibilidad, incorporando modelos financieros avanzados (CAPEX/OPEX, TCO, ROI) y contratos inteligentes. Este proceso permite incorporar proveedores tecnológicos o innovadores de servicios digitalizados y establecer alianzas tecnológicas que fortalecen la madurez digital del sistema de mantenimiento. Se deben establecer contratos definiendo responsabilidades claras para gestionar estos elementos externos y asegurar la interoperabilidad de datos, la protección de la información y la trazabilidad. Además, es esencial formalizar el intercambio de conocimiento entre la organización y los proveedores mediante acuerdos técnicos y mecanismos de comunicación estandarizados. Todo servicio externo debe cumplir con los requisitos normativos y operativos, ser monitoreado regularmente y evaluado por su impacto en el rendimiento, riesgos y valor del activo. Para ello se cuenta con los siguientes documentos:

- COM-DI-01: Ficha de Caracterización de Proceso - Compras
- COM-PR-01: Procedimiento Compras
- COM-PR-02: Procedimiento Evaluación de Proveedores
- COM-DI-01: Plantilla de Contrato de Bienes y Servicios
- COM-RE-03: Lista de Proveedores
- COM-RE-04: Criterios de evaluación de proveedores
- COM-RE-05: Evaluación y Seguimiento de proveedores

- COM-RE-06: Requisitos de selección de proveedores
- COM-DI-02: Plantilla de Análisis de Viabilidad Financiera

8. Evaluación del desempeño

Se identificaron los elementos críticos a evaluar: determinar qué activos, procesos, indicadores, requisitos de partes interesadas y variables del sistema serán objeto de seguimiento (criterios: criticidad, costo, impacto en la producción o seguridad).

En el diseño de KPIs y métodos de análisis se estableció objetivos e indicadores SMART (OEE, MTBF, MTTR, disponibilidad, índice de predicción acertada) y cualitativos (satisfacción del usuario, confiabilidad de diagnósticos automáticos).

En la integración tecnológica y automatización se configuro plataformas digitales (SCADA, CMMS, ERP, plataformas cloud, sistemas de IA, Power BI, etc.) para la recolección, trazabilidad y visualización de datos de desempeño.

En la evaluación y toma de decisiones se analizar tendencias, brechas y desviaciones. Evaluar el aporte de los activos y del sistema de mantenimiento al cumplimiento de los objetivos estratégicos

Se comunica a las partes interesadas: emitir informes periódicos a la alta dirección, gerencias, áreas funcionales y usuarios clave

La organización ha planeado e implementado procesos de seguimiento, medición, análisis y evaluación. Los métodos de estos procesos de medición, análisis y evaluación se definen:

- SGM-PR-05: Procedimiento de seguimiento y evaluación del desempeño
- SGM-DI-09: Tablero de Objetivos SMART del SGM 4.0
- SGM-DI-21: Informe de evaluación del desempeño
- SGM-RE-11: Minuta de revisión por la dirección

Todas las áreas y/o procesos que integran el SGM 4.0 son evaluadas a intervalos planificados para determinar si es conforme con los requisitos de la norma ISO 55001:2024 y los requisitos establecidos por la organización. Con este propósito se ha implementado el Procedimiento de Auditorías Internas (SGM-PR-07), documento que define las responsabilidades y requisitos para la planificación de las auditorías internas, los criterios de selección de los auditores internos, su realización y presentación de resultados, así como el manejo de los registros correspondientes.

Los criterios de la auditoria y el alcance de la misma se definen en el Plan de Auditoria (SGM-DI-23) y en el informe de auditoría que elaboran los auditores.

Se planifica las auditorías internas considerando el estado y la importancia de los procesos y áreas a auditar, así como resultados de auditorias previas. La frecuencia de evaluación se establece en el Programa Anual de Auditoria (SGM-DI-22), el cual puede complementarse con auditorias extraordinarias autorizadas por el Gerente General. Todos los requisitos del SGM 4.0 deben ser auditados por lo menos una vez al año.

La Jefatura o Gerencia que este siendo auditada debe asegurar la implementación de acciones sin demora injustificada para eliminar las no conformidades y sus causas que pudieran encontrarse durante la auditoría.

Ejecución y evidencia digital: realizar auditorías presenciales, remotas (digital twins, RA), o mixtas, registrando evidencias mediante plataformas documentadas y trazables.

La revisión por alta dirección es periódico SGM 4.0, una vez al año, utilizando informes de desempeño, hallazgos de auditoría, desviaciones, cumplimiento de objetivos, riesgos y oportunidades emergentes.

La ejecución de la revisión se desarrolla en una reunión formal de alta dirección donde se evalúan la adecuación del SGM 4.0, la alineación con la estrategia, los resultados obtenidos y las oportunidades de mejora.

La toma de decisiones y asignación de recursos esta enfocado a aprobar ajustes a objetivos, asignación de presupuesto, nuevas herramientas, formación técnica, o rediseño de procesos digitales.

Se implementa seguimiento de compromisos estableciendo mecanismos digitales (dashboards, alertas) para monitorear el cumplimiento de decisiones.

Se mantiene la Información documentada:

- SGM-PR-07: Procedimiento de revisión por la dirección
- SGM-RE-16: Informe de revisión por la dirección
- SGM-RE-17: Acta de reunión de revisión por la dirección

9. Mejora

La mejora continua en un SGM 4.0 se integra en un ciclo iterativo automatizado de monitoreo, análisis y optimización. Se basa en el modelo PDCA (Plan-Do-Check-Act), pero con soporte digital mediante analítica de datos, tableros de control inteligentes y revisión periódica de indicadores, para ello se cuenta con un Procedimiento de mejora continua del SGM 4.0 (SGM-PR-08) y Propuestas de Iniciativas de Innovación Tecnológica (SGM-RE-18) elaborado por la Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), a fin de:

- Planificar mejoras alineadas con los objetivos del mantenimiento y los activos críticos.
- Ejecutar cambios piloto, como ajustes en frecuencia de mantenimiento, integración de sensores o automatización de tareas.
- Analizar resultados de los KPIs y análisis con modelos de machine learning para detectar anomalías o tendencias.
- Actuar, estandarizando cambios eficaces o escalando mejoras.

Las causas de no conformidades deben ser investigadas con el objeto de implementar las Acciones Correctivas correspondientes a prevenir de esta manera su recurrencia. Con este objetivo, se ha definido el Procedimiento de Acciones Correctivas (SGM-PR-09) que permite la implementación y seguimiento. El sistema debe ser capaz de registrar incidentes o desviaciones en tiempo real, analizar sus causas raíz, ejecutar acciones correctivas proporcionales y verificar su eficacia. Se aplican metodologías estructuradas como Ishikawa, FMEA, TRIPOD Beta o Árbol de fallas encaminados a lograr lo siguiente:

- Revisar no conformidades a los requisitos del SGM 4.0
- Evaluar la necesidad de adoptar acciones inmediatas.
- Determinar las causas de la no conformidad
- Evaluar la necesidad de adoptar acciones para evitar su recurrencia
- Determinar e implantar acciones correctivas

- Registrar los resultados de las acciones tomadas
- Revisión de la implementación y efectividad de la acción tomada

En el SGM 4.0 se cuenta con la acción predictiva fundamentada en la capacidad analítica del para anticipar fallas o necesidades de intervención. Utiliza información en tiempo real de la condición de los activos y modelos matemáticos para calcular la vida útil residual (RUL), priorizar intervenciones y prever consecuencias de decisiones.

ANEXOS

1. SGM-DI-01: Análisis FODA
2. SGM-DI-02: Análisis Partes Interesadas
3. SGM-DI-03: Portafolio de los activos físicos críticos
4. SGM-DI-04: Diseño de la arquitectura funcional del SGM 4.0 para la toma de decisiones basada en datos
5. SGM-DI-05: Mapa de Procesos de SGM 4.0
6. SGM-DI-06: Política de SGM 4.0
7. SGM-DI-07: Organigrama
8. RRHH-MA-01: Manual de Organización y Funciones
9. SGM-DI-08: Análisis de Riesgos y Oportunidades
10. SGM-DI-09: Tablero de Objetivos SMART del SGM 4.0
11. RRHH-PR-01 Procedimiento Reclutamiento y Selección del Personal
12. RRHH-PR-02 Procedimiento de evaluación de la capacitación del personal
13. RRHH-PR-02 Procedimiento de Inducción de Personal
14. SGM-PR-01: Procedimiento para el Control de Documentos y Registros
15. SGM-DI-11: Plan maestro de mantenimiento 4.0
16. SGM-DI-12: Plan de gestión del ciclo de vida de activos físicos y digitales.
17. SGM-PR-02: Procedimiento de planificación y programación de mantenimiento
18. SGM-DI-13: Plan de Mantenimiento Predictivo (PdM)
19. SGM-DI-14: Plan de inspecciones técnicas basadas en condición
20. SGM-DI-15: Plan de mantenimiento preventivo
21. SGM-DI-16: Programa de Mantenimiento Predictivo (PdM)
22. SGM-DI-17: Programa de inspecciones técnicas basadas en condición
23. SGM-DI-18: Programa de mantenimiento preventivo
24. SGM-PR-03: Procedimiento de ejecución de ordenes de trabajo de mantenimiento
25. SGM-IT-01: Instructivo de instalación y calibración de sensores
26. SGM-IT-02: Instructivo para la adquisición y transmisión automático de Datos
27. SGM-IT-02: Instructivo de configuración y operación del CMMS
28. SGM-IT-03: Instructivo de tareas con realidad aumentada
29. SGM-IT-04: Instructivo de tareas con digital twins
30. SGM-PR-04: Procedimiento para la definición, cálculo y revisión de KPIs
31. SGM-PR-05: Procedimiento para identificar, analizar, evaluar y gestión de riesgos
32. SGM-DI-19: Manual de ciberseguridad industrial
33. SGM-DI-20: Guía para Integración sistemas interoperables de (SCADA, CMMS, ERP, plataformas cloud, sistemas de IA, etc.)

34. SGM-DI-21: Guía para Entrenamiento de Modelos de IA/ML
35. SGM-RE-01: Registro de Datos de Condición de Activos Físicos
36. SGM-RE-02: Registro de Modelos Predictivos Activos
37. SGM-RE-03: Registro de Alertas Inteligentes
38. SGM-RE-04: Registro de Órdenes de Trabajo
39. SGM-RE-05: Registro de KPIs del Mantenimiento 4.0
40. SGM-RE-06: Registro de Gemelos Digitales Operativos
41. SGM-RE-07: Registro de Cambios Tecnológicos
42. SGM-RE-08: Registro de Fallas Detectadas por IA
43. SGM-RE-09: Registro de Uso de Realidad Aumentada
44. SGM-RE-10: Registro de Análisis y Decisiones Basadas en Datos
45. SGM-PR-05: Procedimiento integral de control de cambios en Mantenimiento 4.0
46. LOG-PR-01: Procedimiento de gestión logística y almacenes
47. LOG-RE-01: Registro de Repuestos Críticos
48. LOG-IT-01: Instructivo de Trazabilidad de Repuestos Críticos
49. COM-DI-01: Ficha de Caracterización de Proceso - Compras
50. COM-PR-01: Procedimiento Compras
51. COM-PR-02: Procedimiento Evaluación de Proveedores
52. COM-DI-01: Plantilla de Contrato de Bienes y Servicios
53. COM-RE-03: Lista de Proveedores
54. COM-RE-04: Criterios de evaluación de proveedores
55. COM-RE-05: Evaluación y Seguimiento de proveedores
56. COM-RE-06: Requisitos de selección de proveedores
57. COM-DI-02: Plantilla de Análisis de Viabilidad Financiera
58. SGM-PR-06: Procedimiento de seguimiento y evaluación del desempeño
59. SGM-DI-21: Informe de evaluación del desempeño
60. SGM-RE-11: Minuta de revisión por la dirección
61. SGM-PR-07: Procedimiento Auditorías Internas
62. SGM-RE-12: Lista Maestra de Documentos
63. SGM-RE-13: Solicitud de Acción Correctiva
64. SGM-RE-14: Control de Acciones Correctivas
65. SGM-DI-22: Programa Anual de Auditorías
66. SGM-DI-23: Plan de Auditoría Interna
67. SGM-RE-15: Informe de Auditoría Interna
68. SGM-PR-07: Procedimiento de revisión por la dirección
69. SGM-RE-16: Informe de revisión por la dirección
70. SGM-RE-17: Acta de reunión de revisión por la dirección
71. SGM-PR-08: Procedimiento de mejora continua del SGM 4.0
72. SGM-RE-18: Propuestas de Iniciativas de Innovación Tecnológica
73. SGM-PR-09: Procedimiento de Acciones Correctivas