

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**“HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO PARA EVALUAR LOS PROCESOS  
DIGITALES EN UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO”**

Trabajo de Titulación para optar al título de  
Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno:

Sr. Benjamín Rodrigo Arellano Salgado

Profesor Guía:

PhD. Mg. Ing. Carlos Parra Márquez

**2023**

## **RESUMEN**

**KEYWORDS:** PROCEDIMIENTO; IMPLEMENTAR; INDUSTRIA 4.0; ÁREA DEL MANTENIMIENTO; AMORMS.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la implementación de las diversas tecnologías que nos ofrece industria 4.0 con relación a mejorar la gestión del mantenimiento en las empresas. Para ello, se entrelazarán ideas de la auditoría ASSET MANAGEMENT, OPERATIONAL RELIABILITY & MAINTENANCE SURVEY, propuesta por Crespo Márquez Adolfo y Parra Márquez Carlos (2015), así como el Modelo de Gestión de Mantenimiento de 8 fases descrito en su libro Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de activos. además de explorar las distintas tecnologías ofrecidas por la industria 4.0, como el Big Data, IoT, Cloud, Digital Twins y Blockchain.

Capítulo 1: En el primer capítulo, se abordará la problemática que presentan las auditorías de mantenimiento actuales. Se proporcionará una breve explicación de la historia de la industria 4.0. Además, se ofrecerá una descripción concisa del Modelo de Gestión de Mantenimiento y la auditoría AMORMS, la cual se basa en dicho modelo. Por último, se explicarán las diversas tecnologías que forman parte de la industria 4.0, junto con un breve análisis de cómo podrían implementarse estas tecnologías en el campo del mantenimiento.

Capítulo 2: Este capítulo se enfoca en potenciar la auditoría de mantenimiento AMORMS mediante la integración de las tecnologías de la industria 4.0 y la adaptación del Modelo de Gestión de Mantenimiento a la industria 4.0. Comienza con una introducción a "AMORMS 4.0", explicando sus bases y el enfoque que proyecta, planteando el modelo de gestión de mantenimiento adaptado a las principales tecnologías de la industria 4.0 en el ámbito del mantenimiento. Se describen con detalle su enfoque y procedimiento de implementación, resaltando cómo proyecta y evalúa los datos. Además, se establecen los niveles de madurez digital que se abordarán a través de un cuestionario guía, y se presenta un ejemplo ilustrativo de la aplicación de la metodología.

Capítulo 3: Finalmente, el estudio se aplica en una empresa del rubro de arriendo de equipos y maquinarias, con la participación de cuatro expertos en el ámbito del mantenimiento. En donde se obtuvieron resultados promedios basados en la escala de evaluación por parte de la AMORMS, mientras que para la evaluación Digital se observó una baja participación dentro de la industria 4.0 en general, dando a entender el nivel actual en el cual se encuentra la empresa. En base a los resultados se generan recomendaciones para mejorar la gestión del mantenimiento dentro de la empresa.



ÍNDICE

RESUMEN.....

ÍNDICE .....

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....

ÍNDICE DE TABLAS.....

ÍNDICE DE ANEXOS.....

SIGLAS Y DEFINICIONES.....

INTRODUCCIÓN ..... 1

OBJETIVOS .....3

CAPÍTULO 1: IDENTIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0  
E INTRODUCCIÓN A LA HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO .....5

1. PROBLEMÁTICA.....6

1.1. MGM Y AUDITORÍA AMORMS .....6

1.2. INDUSTRIA 4.0 .....9

1.3. TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0 APLICADAS AL MANTENIMIENTO  
..... 10

1.4 INTRODUCCIÓN A LA HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO AMORMS 4.0  
.....20

CAPÍTULO 2: PROPUESTA DE DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE  
DIAGNÓSTICO “AMORMS 4.0” .....25

2.1 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE  
DIAGNÓSTICO AMORMS 4.0 .....26

CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO AMORMS  
4.0.....41

3.1. DATOS DE ENCUESTAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....42

3.2. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS .....45

3.3 RECOMENDACIONES PARA LA EMPRESA .....47

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....54

REFERENCIAS.....56

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| ANEXOS .....                                    | 59 |
| ANEXO A: PREGUNTAS AUDITORÍA AMORMS .....       | 59 |
| ANEXO B: CUESTIONARIO COMPLETO AMORMS 4.0 ..... | 69 |

**ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustación 1-1: Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) .....                                            | 7  |
| Ilustración 1-2: Tipos de Redes Neuronales .....                                                          | 12 |
| Ilustración 1-3: Representación nodos Blockchain. ....                                                    | 14 |
| Ilustración 1-4: Representación IioT. ....                                                                | 15 |
| Ilustración 1-5: Cloud Storage. ....                                                                      | 16 |
| Ilustración 1-6: Logo ChatGPT.....                                                                        | 17 |
| Ilustración 1-7: Representación de una reunión virtual. ....                                              | 18 |
| Ilustración 1-8: Distribución de tipos de error en el ciclo de vida una instalación. ....                 | 19 |
| Ilustración 1-9: Propuesta Modelo de Gestión de Mantenimiento con la integración de la industria 4.0..... | 20 |
| Ilustración 2-11: Gráfico evaluación digital (4.0). ....                                                  | 32 |
| Ilustración 2-10: Gráfico Auditoría AMORMS. ....                                                          | 32 |
| Ilustración 2-12: Gráfico tipo radial Auditoría AMORMS. ....                                              | 34 |
| Ilustración 2-13: Gráfico tipo radial Digitalización. ....                                                | 37 |
| Ilustración 3-14: Gráfico tipo radial Auditoría AMORMS. ....                                              | 43 |
| Ilustración 3-15: Gráfico tipo radial Digitalización. ....                                                | 44 |
| Ilustración 3-16: Fórmula Alfa de Cronbach .....                                                          | 45 |
| Ilustración 3-17: Niveles de confiabilidad Alfa de Cronbach. ....                                         | 45 |
| Ilustración 3-18 Comparación KPI’S XGBoost - ARIMA. ....                                                  | 51 |
| Ilustración 3-19 Sistema de alarma de mantenimiento predictivo de Baker Hughes. ....                      | 53 |

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1-1 Historia de la Revolución Industrial .....9

Tabla 2-2 Puntaje Auditoría AMORMS .....31

Tabla 2-3 Puntaje evaluación Digital 4.0 .....32

Tabla 2-4 Evaluación AMORMS 4.0 .....34

Tabla 2-5 Evaluación digital .....38

Tabla 3-6 Ponderación final AMORMS.....43

Tabla 3-7 Ponderación final evaluación digital.....44

Tabla 3-8 Resultados Alpha de Cronbach AMORMS.....46

Tabla 3-9 Resultado Alpha de Cronbach Evaluación 4.0.....46

**ÍNDICE DE ANEXOS**

ANEXOS.....59

ANEXO A: PREGUNTAS AUDITORÍA AMORMS.....59

ANEXO B: CUESTIONARIO COMPLETO AMORMS 4.0.....69



**SIGLAS Y DEFINICIONES**

**Siglas:**

**AMORMS:** Asset Management, Operational Reliability & Survey (Auditoría de Gestión de Activos, Confiabilidad Operacional y Mantenimiento)

**IA :** Artificial Intelligence (Inteligencia Artificial)

**IoT :** Internet of Things (Internet de las cosas)

**IioT :** Industrial Internet of Things (Internet Industrial de las cosas)

**TIC :** Tecnologías de la Información y Comunicación

**MGM :** Modelo de Gestión del Mantenimiento

**FF :** Frecuencia de Falla

**MTTR:** Mean Time To Repair (Tiempo Medio de Reparación)

**MTBF:** Mean Time Between to Failures (Tiempo Medio Entre Fallas)

**MDT :** Mean Down Time (Tiempo Medio Fuera de Servicio)

**A :** Availability (Disponibilidad)

**TPM :** Total Productive Maintenance (Mantenimiento Productivo Total)

**RCM :** Reability Centered Maintenance (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad)

**KPI :** Key Performance Indicator (Indicador Clave de Desempeño)

**SCADA:** Supervisory Control and Data Acquisition (Control de supervisión y Adquisición de Datos)

**S. DAQ:** Sistema de Adquisición de datos

**LCCA:** Life Cycle Cost Analysis (Análisis de Costo del Ciclo de Vida)

**AMEF:** Análisis de Modo y Efecto de Fallas.

**PMO :** Planned Maintenance Optimisation (Análisis de Mantenimiento Futuro)

**CMMS:** Computerized Maintenance Management System (Gestión de mantenimiento asistido por computadora).

**MAPE:** Error Absoluto Medio Porcentual.

**RMSE:** Raíz del Error Cuadrático Medio.

**MAE :** Error absoluto Medio.

**Definiciones:**

**Mantenimiento Preventivo:** Mantenimiento llevado a cabo según un cronograma de tiempo establecido.

**Mantenimiento Correctivo-Reactivo:** Mantenimiento generado tras la identificación de una falla hasta finalizar la restauración.

**Mantenimiento Predictivo:** Mantenimiento según la predicción de una condición de un activo evaluado, determinado en base a un histórico de datos y parámetros operacionales futuros conocidos.

## **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo de título, se abordan temas relacionados con la Industria 4.0 y la digitalización, proponiendo mejorar una auditoría tradicional de mantenimiento conocida como "AMORMS". El objetivo es añadir una evaluación del nivel digital de una empresa, para este caso se desarrollará específicamente en la Sociedad de Arriendos de Equipos y Maquinarias MPM Ltda. la cual se encuentra ubicada en el kilómetro 12 de Antofagasta, empresa dedicada a la prestación de servicios de arriendo de equipos y maquinarias tales como; camiones tolva, minicargadores, retroexcavadoras, equipos de izaje, compresores, entre otros.

En este contexto la falta de herramientas de evaluación digital en el ámbito del mantenimiento industrial impulsa el desarrollo de una herramienta que facilite la evaluación de las tecnologías de la Industria 4.0. En este trabajo, se desarrolló una herramienta de diagnóstico basada en la auditoría AMORMS y la Industria 4.0. Este enfoque toma como inspiración un período pasado, teniendo a referentes como Salih O. Duffuua, un destacado experto en mantenimiento dedicó su atención a la optimización y confiabilidad de los sistemas de producción. En ese contexto, se exploró cómo las empresas operaban con las tecnologías de la Industria 3.0. Un ejemplo destacado de esta exploración es un estudio titulado "Interoperabilidad para la Calidad de las Operaciones y el Mantenimiento", que resaltó la interoperabilidad y sus beneficios para las empresas, estableciendo niveles y proporcionando ejemplos concretos de su aplicación.

Finalmente, su objetivo principal fue evaluar el nivel actual de digitalización de la empresa mediante un cuestionario guía y analizar las posibles mejoras con las nuevas tecnologías más adecuadas para cada fase del MGM. Se implementó la herramienta de diagnóstico en una empresa del rubro de arriendo de equipos y maquinarias, con el fin de poner en práctica la herramienta de diagnóstico. Se obtuvieron distintas oportunidades de mejora para la empresa y con ello se generaron las recomendaciones que benefician a la gestión del mantenimiento de la empresa.



## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

Desarrollar una herramienta de diagnóstico basada en la industria 4.0 con el fin de evaluar los procesos digitales y destacar las oportunidades de mejora en la gestión del mantenimiento en activos industriales de una empresa dedicada al arriendo de equipos y maquinarias, a través del uso de bibliografías.

### **Objetivos específicos:**

1. Identificar las herramientas de la industria 4.0 con el fin analizar el impacto de su implementación en las distintas fases del Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) mediante el uso de bibliografía.
2. Diseñar una herramienta de diagnóstico basada en las tecnologías de la industria 4.0 con el fin de evaluar los procesos digitales vinculados con la gestión de mantenimiento mediante la metodología de la auditoría AMORMS.
3. Implementar la herramienta de diagnóstico basada en la industria 4.0 en una empresa del rubro de arriendo de equipos y maquinarias con el fin de analizar la gestión del mantenimiento mediante el uso de cuestionario un AMORMS 4.0.



## **CAPÍTULO 1: IDENTIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0 E INTRODUCCIÓN A LA HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO**

## **1. PROBLEMÁTICA**

En los últimos años, se ha presenciado un crecimiento constante en la diversidad de tecnologías digitales disponibles. Este panorama puede plantear un desafío para las empresas que no se encuentren familiarizadas con el avance tecnológico, este repentino cambio puede generar que algunas empresas deban verse obligadas a integrar nuevas tecnologías en sus operaciones si desean mantenerse competitivas, para que no les pase lo que les ocurrieron a grandes empresas como Kodak y Blockbuster, que estando en la cima no pudieron adaptarse a los cambios que se venían generando. Existe la posibilidad de que en un futuro no muy lejano se deban considerar las tecnologías de la industria 4.0 no como un “lujo”, sino como una herramienta básica para la gestión del mantenimiento y de activos. Las principales dificultades a las que se podrían enfrentar sería no contar con la pericia necesaria en diversos campos tecnológicos, la falta de un marco orientador efectivo complica la evaluación de la eficacia de su adopción tecnológica.

En la actualidad, se observa la existencia de diversas auditorías tradicionales de mantenimiento que no abordan los procesos vinculados a la industria 4.0. Esta carencia ha impulsado la propuesta de mejorar una auditoría la cual lleva el nombre de AMORMS que está basada en un modelo de gestión de mantenimiento. El objetivo es incorporar la evaluación de los procesos digitales de la industria 4.0 en el área del mantenimiento. Esta actualización busca añadir una nueva evaluación que permita fortalecer la falta de una herramienta que permita evaluar los procesos del mantenimiento relacionados con la industria 4.0.

### **1.1. MGM Y AUDITORÍA AMORMS**

A continuación, se presentarán las metodologías tomadas como referencia para plantear las bases para proponer la herramienta de diagnóstico basada en la industria 4.0, con el fin que pueda ser de utilidad para evaluar los procesos digitales de la gestión del mantenimiento.

#### **1.1.1 Modelo de Gestión del Mantenimiento (MGM):**

El Modelo de Gestión del Mantenimiento (MGM) (ver ilustración 1-1.), desarrollado por Crespo Márquez Adolfo y Parra Márquez Carlos (2004), tiene como objetivos principales evaluar los procesos relacionados con la gestión de mantenimiento, en base a ello facilita la implementación de mejoras en las distintas fases del MGM que se describen en las siguientes páginas, teniendo en cuenta que al implementar la metodología de forma efectiva y con un buen equipo de trabajo puede crear oportunidades de mejoras en los distintos aspectos tales como; disponibilidad de los activos, reducción de costos de

mantenimiento, optimización de la planificación y programación del mantenimiento, mejora en la confiabilidad operativa y el establecer indicadores de desempeño claros. El MGM consta de 8 fases resumidas a continuación:

Fase 1: Definición de objetivos (KPIs), estrategias, organigrama y procesos a manejar en el área de mantenimiento. Debe tener una estructura capaz de maximizar la eficiencia de los activos, y cada organización posee su propio modelo integral.

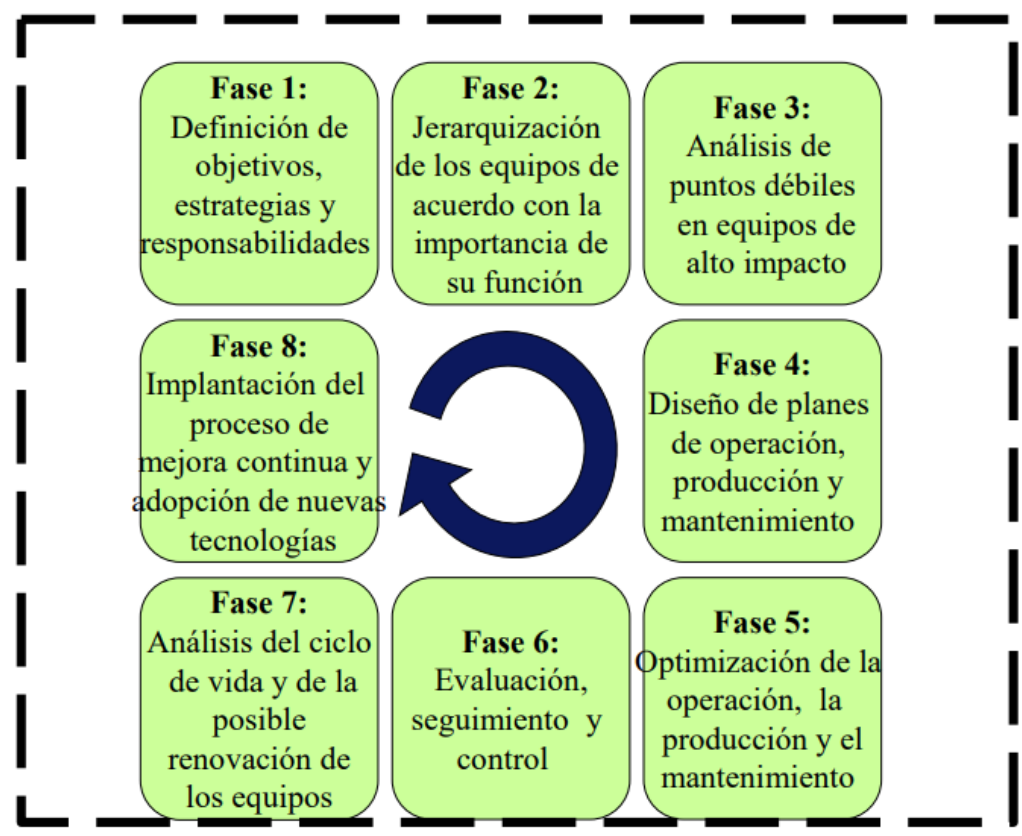


*Ilustración 1-1: Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) (procesos de Mantenimiento, Confiabilidad y riesgo) – integración con el proceso ISO 55000 (Crespo y Parra, 2004, Parra y Crespo, 2015).*

Fase 2: Herramientas técnicas para la toma de decisiones. La jerarquización está relacionada con los procesos de criticidad, utilizando un "Modelo integral" para definir lo que es crítico. Se genera una evaluación de lo que es crítico para el dueño del activo.

Fase 3: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto. Es esencial estar constantemente evaluando los modelos de fallas rutinarios y no acostumbrarse a simplemente reparar fallas. Se debe generar un plan paso a paso para que todos utilicen un procedimiento regulado y estandarizado, estableciendo un proceso ordenado de análisis de falla.

Fase 4: Diseño de planes de operación, producción y mantenimiento, abarcando aspectos relacionados con RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) y TPM (Mantenimiento Productivo Total), con el fin de generar planes óptimos.

Fase 5: Optimización de la operación, producción y mantenimiento, derivada de la Fase 4, se enfoca en perfeccionar los planes y programas de mantenimiento para asegurar su

efectividad y eficiencia. Esto implica encontrar la combinación óptima de tareas de mantenimiento, su frecuencia y la asignación de recursos, con el objetivo de prolongar la vida útil del activo y minimizar los costos.

Fase 6: Evaluación, seguimiento y control, utilizando indicadores técnicos y económicos, así como evaluadores de desempeño como FF (Frecuencia de Falla), MTTF (Tiempo Medio al Fallo), MTTR (Tiempo Medio de Reparación) y A (Disponibilidad). Se alinea con la fase 1 para tomar contexto.

Fase 7: En la fase de "Análisis del ciclo de vida", se considera la posible renovación de los equipos o la realización de overhauls. Esta etapa se centra en examinar los aspectos económicos de los diversos activos, con el objetivo de calcular el costo total que generará el activo a lo largo de su vida útil. Para esto, se tienen en cuenta tanto los costos directos como los costos indirectos

Fase 8: La fase de "Implementación del proceso de mejora continua y adopción de nuevas tecnologías" tiene como objetivo fomentar la innovación y la actualización. Se enfatiza la idea de no quedarse en la zona de confort, ya que siempre se pueden introducir nuevos cambios o mejoras en los procesos. Esta etapa motiva a la empresa a estar constantemente generando nuevos desafíos.

#### 1.1.2 Técnica de diagnóstico AMORMS:

La herramienta de diagnóstico AMORMS, propuesta por Adolfo Crespo M. y Carlos Parra M. (2015), se desarrolla en base al MGM. Permite evaluar las 8 fases propuestas por este modelo:

1. Gestión de Activos, Objetivos del Negocios (KPIS) y organización de soporte.
2. Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (criticidad de equipos).
3. Análisis de problemas (manejo de fallas).
4. Procesos de programación y planificación.
5. Procesos de asignación de recursos, soporte informático y logístico.
6. Procesos de control y análisis de indicadores técnicos RAM.
7. Proceso de análisis de costos de ciclo de vida.
8. Procesos de revisión y mejora continua.

En donde se plantean diferentes preguntas que permiten evaluar el desempeño de la empresa en las distintas fases (Ver Anexo A).

Teniendo en cuenta lo anterior debido al año en que se desarrolló la AMORMS, su modelo de auditoría tradicional no aborda en profundidad las tecnologías de la Industria 4.0 relacionadas con el mantenimiento. Por esta razón, en las siguientes páginas se

explicarán las posibles tecnologías a incorporar para realizar una actualización de la AMORMS que incluya la evaluación de las tecnologías y herramientas digitales proporcionadas por la conocida Industria 4.0.

1.2. INDUSTRIA 4.0

La industria 4.0, o la cuarta revolución industrial, tiene como significado principal la desvinculación de la persona en ciertos procesos industriales. ¿Qué significa la desvinculación de la persona? Básicamente, se refiere al hecho de que las tecnologías están transformando la forma en que trabajamos. Se han incorporado tecnologías que las personas simplemente no pueden llevar a cabo por sí solas. Un claro ejemplo es el Big Data; una sola persona no podría manejar la gran cantidad de datos y encontrar información clave. Si consideramos a una persona trabajando con una herramienta de procesamiento de datos "básica" como Excel, incluso en el caso de poder analizar tal magnitud de datos, tomaría mucho más tiempo que utilizar una herramienta especializada para el procesamiento de datos. Por esta razón, la industria se centra en la búsqueda de herramientas que permitan la automatización de estos procesos y funciones.

Tabla 1-1 Historia de la Revolución Industrial

| Versión | Nombre                         | Siglos   | Innovación                                                | Características                                                            |
|---------|--------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1.0     | Primera revolución industrial. | XVII-XIX | Máquina a vapor, expansión de la industria textil.        | La mecanización de la producción.                                          |
| 2.0     | Segunda revolución industrial. | XIX-XX   | Ferrocarril, producción en masas, maquinas automatizadas. | Adopción de la energía eléctrica, el desarrollo en la industria del acero. |
| 3.0     | Tercera revolución industrial. | XX       | Computadores, Electrónica.                                | Las tecnologías digitales, la automatización de procesos industriales.     |
| 4.0     | Cuarta revolución industrial.  | XX       | Interconexiones, IA, IoT.                                 | Digitalización e interconexión, robótica, Big Data.                        |

(Fuente: Elaboración propia a partir de: Peralta-Abarca, J. del C., Martínez-Bahena, B., & Enríquez-Urbano, J. (2021). Industria 4.0. *Inventio*,16(39), 1–7. <https://doi.org/10.30973/inventio/2020.16.39/4>)

### **1.3. TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0 APLICADAS AL** **MANTENIMIENTO**

A continuación, se presentan algunos conceptos de las tecnologías más comunes de la industria 4.0 que pueden ser aprovechadas para mejorar los procesos de gestión de mantenimiento.

#### **1.3.1. Big Data**

Como bien indica su nombre, "Big Data" hace referencia a la gran cantidad de datos que no pueden ser tratados por un software convencional. Estos conjuntos de datos se conocen como "Big Data". Se obtienen datos de diversas fuentes, se procesan, se les da formato y se almacenan a través de varias distribuciones. Además, se utiliza la lógica basada en algoritmos. La recolección de datos se puede combinar con la inteligencia artificial (IA) para generar modelos predictivos y prescriptivos. Los datos extraídos se convierten en predicciones de comportamiento, lo que permite predecir gustos y necesidades.

Las "V" del Big Data" son un conjunto de características esenciales que definen este concepto:

- **Volumen:** Hace referencia a la inmensa cantidad de datos que posee el Big Data. Su escala puede variar desde terabytes (1000 GB) hasta exabytes (mil millones de GB o  $10^6$  TB).
- **Velocidad:** Implica el tiempo de reacción necesario para procesar los datos y tomar decisiones. Esto significa que el análisis de datos se realiza en tiempo real o lo más cercano posible a tiempo real para permitir decisiones rápidas.
- **Variedad:** Como su nombre indica, esta característica del Big Data involucra la diversidad de datos y fuentes incluidas en el análisis. Esto abarca desde bases de datos estructuradas (fáciles de analizar, como hojas de cálculo) hasta datos semi estructurados (requieren procesos dinámicos para reglas complejas, como audio, video e imágenes) o no estructurados (mensajes de texto, ubicaciones y contenidos de redes sociales).
- **Veracidad:** Se refiere a la confiabilidad de los datos recopilados, ya que es posible que se obtengan datos contradictorios o con errores.
- **Valor:** Esta "V" es fundamental y refleja el propósito principal del Big Data, que es obtener resultados con un valor significativo para la toma de decisiones. Proporciona diversas oportunidades de mejora.

En resumen, el Big Data se utiliza para el análisis de tendencias y la optimización de procesos. Permite identificar patrones y tendencias en los datos de mantenimiento, lo que puede facilitar la toma de decisiones. También contribuye a descubrir áreas potenciales de optimización en los procesos de mantenimiento, con el objetivo de reducir costos y mejorar la eficiencia.

### 1.3.2. Inteligencia Artificial

Dentro del campo de la inteligencia artificial (IA), se pueden abordar varios ámbitos, como el Machine Learning (Aprendizaje Automático) y las Redes Neuronales, y cada uno de ellos puede contribuir de distintas maneras al área del mantenimiento.

**Machine Learning:** Como su nombre indica, el Machine Learning se basa en algoritmos capaces de recibir datos y aprender constantemente de ellos. El aprendizaje automático se puede programar de diferentes maneras:

- **Aprendizaje supervisado:** En este enfoque, se proporciona al algoritmo un conjunto de datos como entrada y una variable objetivo-correcta. Con base en esto, genera una función que aproxima los datos según la variable objetivo. Este tipo de aprendizaje se divide en clasificación para variables categóricas y regresión para variables numéricas.
- **Aprendizaje no supervisado:** En este tipo de aprendizaje, no se proporciona una variable objetivo para los datos de entrada. El algoritmo debe ser capaz de encontrar patrones y relaciones entre los datos sin un objetivo claro. Su enfoque principal radica en la detección de estructuras, tendencias, conglomerados y datos no convencionales.
- **Aprendizaje por refuerzo:** Se basa en el principio del "ensayo y error". Esto significa que el algoritmo es retroalimentado según sus acciones en el entorno. En otras palabras, si su comportamiento es positivo, se le asigna una recompensa, y si su comportamiento es negativo, se le penaliza para que no vuelva a tomar este tipo de decisiones en el futuro.

El Machine Learning ofrece una amplia gama de aplicaciones en el ámbito del mantenimiento y puede ser utilizado para mejorar la toma de decisiones, identificar patrones y optimizar procesos.

**Redes Neuronales:** Aunque las Redes Neuronales se consideran una rama del Machine Learning, conocida como Deep Learning, su campo es bastante amplio, por lo que a menudo se considera como un sistema independiente. En un contexto más amplio, las redes neuronales se inspiran en el funcionamiento del cerebro humano. Están compuestas por nodos que trabajan en conjunto para procesar la información, similar al funcionamiento de las neuronas. Cada nodo posee su propia activación y genera una salida de datos. La red neuronal puede ser simple o profunda, lo que depende de la cantidad de capas ocultas que posea. (ver ilustración 1-2)

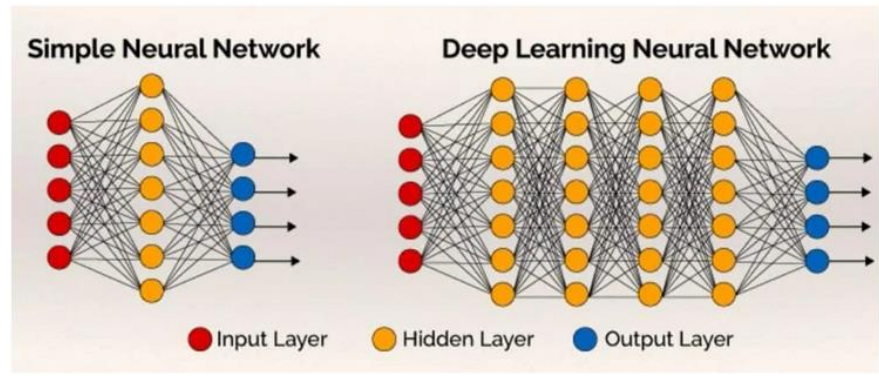


*Ilustración 1-2: Tipos de Redes Neuronales “Imagen extraída desde: <https://www.iartificial.net/redes-neuronales-desde-cero-i-introduccion/>”*

En la ilustración 1-2, se pueden apreciar los nodos de entrada (rojos), que son los primeros en recibir la información; los nodos de procesamiento o capas (amarillos), que se encargan de procesar la información. Cuantas más capas haya, mayor será el procesamiento. Y finalmente, los nodos de salida (azules), que son responsables de proporcionar los resultados finales.

La inteligencia artificial puede contribuir a la generación de análisis predictivos y análisis avanzados de datos, ya que es capaz de identificar patrones y anomalías en grandes conjuntos de datos. Esto puede facilitar la identificación de causas raíz, predecir fallas y mejorar la programación del mantenimiento de manera más eficiente. Todo esto con el objetivo de tomar decisiones fundamentadas en datos.

1.3.3. Digital Twins:

**Gemelos Digitales (Digital Twins):** Básicamente, un Gemelo Digital es una réplica exacta de un activo en forma digital. Esto significa que, basándose en modelos y algoritmos, puede replicar con alta precisión el comportamiento de un activo físico. Si bien el concepto de "Gemelos Digitales" no es nuevo y se ha estado desarrollando desde la década de 1960 con el modelado digital de sistemas físicos, no fue hasta alrededor del

año 2010 que el término "Gemelo Digital" comenzó a tener un mayor impacto, generando investigaciones y formalizando sus avances como una réplica virtual de un objeto físico.

Hoy en día, los Gemelos Digitales se utilizan ampliamente en la industria, especialmente para la toma de decisiones, con un enfoque específico en el mantenimiento predictivo. La construcción de un Gemelo Digital generalmente se divide en tres partes:

1. **Modelo de información del activo físico:** Esto implica la recopilación de todas las características que posee un activo físico y la creación de un modelo de información sobre él. Esto incluye aspectos como la apariencia y el mecanismo del activo. Sin un modelo físico que describa estas características, se perdería el significado y el contexto de los datos que se transmiten a través de la red.
2. **Mecanismo de comunicación de datos entre el Gemelo Digital y el activo físico:** La comunicación entre el Gemelo Digital y el activo físico es esencial. La sincronización depende de la comunicación bidireccional de datos en tiempo real. El activo físico recopila datos e información a través de sensores, IoT, SCADA y DAQ, lo que implica la adquisición y la transmisión de datos en tiempo real.
3. **Módulo de procesamiento de datos para recrear el activo en tiempo real:** El Gemelo Digital utiliza diversas tecnologías de procesamiento de datos, como el Big Data, para filtrar, procesar e interactuar con datos en tiempo real. Esto lo convierte en una herramienta valiosa para la toma de decisiones rápidas.

En resumen, un Gemelo Digital tiene la capacidad de crear simulaciones y pruebas virtuales para analizar el comportamiento de activos y sistemas. Esto ayuda a reducir el riesgo de fallas al permitir una evaluación exhaustiva antes de realizar cambios en el mundo real. Además, proporciona la capacidad de monitorear continuamente en tiempo real el rendimiento de los activos, lo que facilita la identificación de áreas de mejora y la toma de decisiones informadas

#### 1.3.4 Blockchain

**Blockchain:** El Blockchain es una tecnología que ha ganado popularidad en los últimos años, en gran parte debido al auge de las criptomonedas. No obstante, su aplicabilidad se extiende a diversos ámbitos de la industria, como la creación de contratos inteligentes (Smart Contracts), la trazabilidad de la cadena de suministro y los sistemas de información contable. Funciona como un registro contable descentralizado en el que se registran transacciones que se almacenan en bloques de información denominados nodos.

La característica clave del Blockchain es su naturaleza inmutable. Una vez que se registra una transacción en un bloque y se agrega a la cadena, no se puede modificar ni eliminar. Esto proporciona un nivel significativo de seguridad y confiabilidad. Además, la tecnología Blockchain es altamente resistente a la manipulación y a la falsificación de datos.

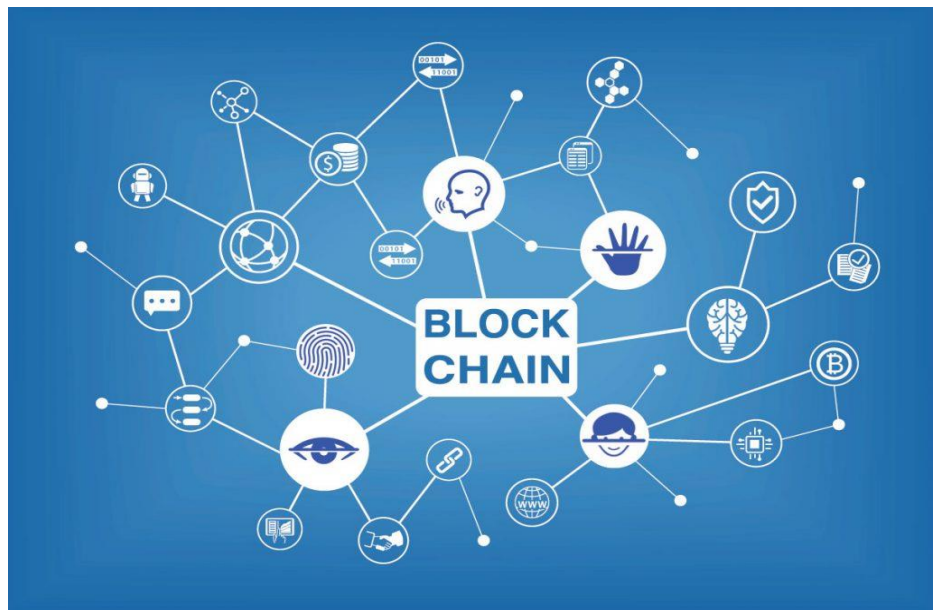


Ilustración 1-3: Representación nodos Blockchain. Imagen extraída desde: <https://mydonor.org/blockchain-for-social-good/>

En el contexto del mantenimiento industrial, el Blockchain se puede utilizar para registrar eventos, como inspecciones, reparaciones y cambios en activos industriales. Estos registros pueden incluir detalles como quién realizó la tarea, cuándo se llevó a cabo y en qué ubicación. Al mantener un historial inmutable de mantenimiento en un Blockchain, se facilita la trazabilidad y la auditoría. Esto es especialmente útil para cumplir con regulaciones y estándares de calidad, así como para llevar un registro preciso de las acciones de mantenimiento a lo largo del tiempo.

1.3.5 Iiot - Internet industrial de las cosas:

**Internet Industrial de las Cosas (IioT):** El Internet Industrial de las Cosas ha transformado la forma en que las empresas gestionan las comunicaciones internas. Es capaz de conectar máquinas, sistemas, dispositivos y sensores en una red conjunta donde se pueden transmitir y almacenar información. Hoy en día, se ha convertido en una tecnología esencial para las empresas, y su aplicación en el área del mantenimiento es especialmente relevante debido a la capacidad de obtener datos en tiempo real.

En el ámbito del mantenimiento, el IIoT se utiliza para el monitoreo en tiempo real y, a partir de sus datos, para predecir posibles fallos. Esta tecnología permite un enfoque proactivo al identificar problemas antes de que ocurran, lo que a su vez reduce el tiempo de inactividad, los costos y aumenta la eficiencia operativa. El IIoT ha revolucionado la gestión de activos al proporcionar una visión más precisa y detallada de su rendimiento.

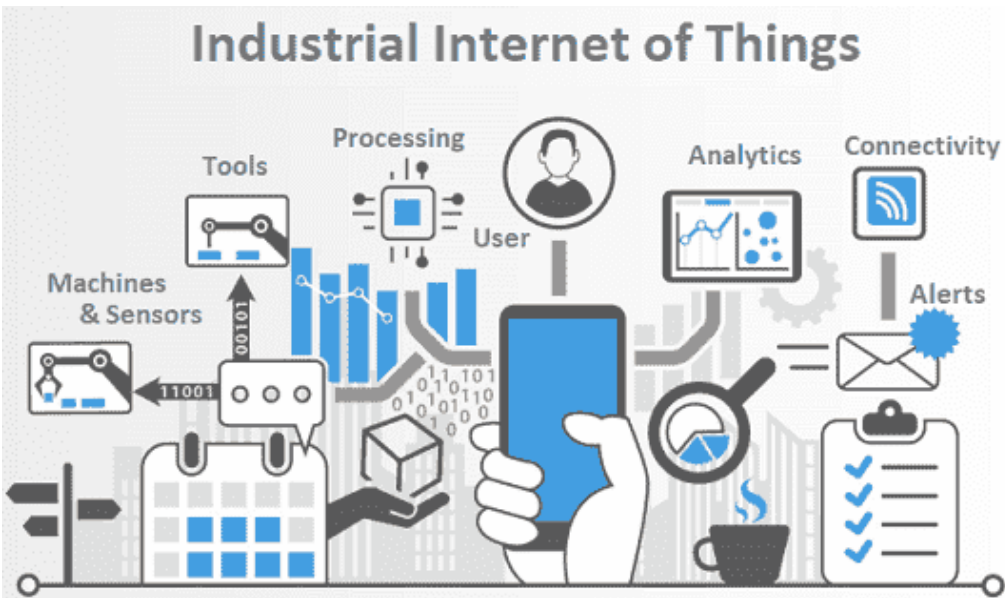


Ilustración 1-4: Representación IioT.” Imagen extraída desde: <https://www.rfpage.com/applications-of-industrial-internet-of-things/>”

1.3.6 Cloud Storage:

El **Almacenamiento en la Nube:** El almacenamiento en la nube es un modo de transmisión y almacenamiento de datos que trabaja en conjunto con fuentes informáticas como redes, servidores y sistemas de almacenamiento. Existen dos tipos principales de nubes: las nubes privadas y las nubes públicas.

- **Nube Privada:** Las nubes privadas son utilizadas principalmente por empresas u organizaciones. Consisten en recursos informáticos que son utilizados exclusivamente por una sola entidad. Estas nubes pueden estar ubicadas en el centro de datos de la propia organización o ser alojadas por un proveedor de servicios externo. A diferencia de las nubes públicas, una nube privada opera siempre en una red privada, y su infraestructura y servicios están dedicados exclusivamente a esa organización.
- **Nube Pública:** Las nubes públicas ofrecen servicios compartidos a través de internet y están disponibles para el público en general. Empresas proveedoras de servicios en la nube alojan y gestionan estos recursos en sus propios centros de datos, y los usuarios pueden acceder a ellos a través de internet.

- **Nubes Híbridas:** Las nubes híbridas combinan la infraestructura local nubes privadas con nubes públicas. En una nube híbrida, los datos y las aplicaciones pueden moverse entre nubes privadas y públicas, lo que proporciona flexibilidad y opciones de implementación adicionales.



*Ilustración 1-5: Cloud Storage, "Imagen extraída desde: [https://www.flaticon.com/free-icon/cloud-storage\\_1208846](https://www.flaticon.com/free-icon/cloud-storage_1208846) "*

La utilización de la nube en el área del mantenimiento posibilita el almacenamiento de datos esenciales, como registros de órdenes de trabajo, cotizaciones, informes de fallos, historial de activos y otra información crucial. Esto permite el acceso a estos datos en cualquier momento y desde cualquier ubicación, reduciendo tiempos de inactividad y mejorando significativamente la eficiencia operativa. Además, el uso de nubes híbridas ofrece opciones adicionales para adaptarse a las necesidades de almacenamiento y gestión de datos de la empresa.

#### 1.3.7 ChatGPT:

**ChatGPT:** Una Transformación en la Interacción con la Tecnología. Aunque ChatGPT pertenece a una rama de la inteligencia artificial, ha ganado notoriedad recientemente debido a su avanzada capacidad de búsqueda de datos. De hecho, ha transformado la manera en que buscamos información y nos comunicamos con sistemas informáticos.

Básicamente, ChatGPT es una inteligencia artificial que utiliza algoritmos de procesamiento de lenguaje natural para generar respuestas de manera coherente y comprensible. Sus siglas "GPT" representan su tipo de inteligencia artificial, que se traduce como "Generative Pre-Trained Transformer." Esto significa que ChatGPT se basa en una red neuronal profunda entrenada previamente, lo que le permite comprender y generar texto de manera contextual, como si estuviera sosteniendo una conversación con un ser humano.

Su capacidad para generar texto de manera coherente y contextual ha revolucionado no solo la búsqueda de información, sino también la interacción con la tecnología en una variedad de aplicaciones, desde asistentes virtuales hasta servicios de atención al cliente y creación de contenido automatizado.



*Ilustración 1-6: Logo ChatGPT “Imagen extraída desde: <https://es.wikipedia.org/wiki/ChatGPT>”*

Con lo anterior mencionado, ChatGPT puede ofrecer una variedad de beneficios a la gestión del mantenimiento. No solo es valioso en la asistencia técnica, sino que también, mediante una retroalimentación efectiva, se puede optimizar su desempeño y utilizarlo para gestionar inventarios, mejorar procesos, facilitar la traducción de idiomas y aplicarlo en diversas otras áreas según las necesidades de la organización. Su capacidad de procesamiento de lenguaje natural lo convierte en una herramienta versátil y poderosa para la mejora de procesos y la toma de decisiones informadas en el ámbito del mantenimiento.

1.3.8 Metaverso:

El Metaverso es una realidad digital en donde las personas pueden interactuar, trabajar y jugar con avatares de todo el mundo. Este concepto ha tomado cierta relevancia durante los últimos años, específicamente en el área de la industria tecnológica. Aunque se basa en la realidad virtual, es una idea que está revolucionando la forma en que hacemos las cosas.

Permite la celebración de reuniones a larga distancia entre avatares digitales y la resolución de problemas en tiempo real mediante la interacción de expertos ubicados en diferentes lugares del continente. Para acceder a esta experiencia, se utilizan diversos accesorios, como la conexión a internet, gafas de realidad virtual, cámaras y otros dispositivos.

Aunque los costos de adquisición de los implementos para el metaverso pueden ser elevados, esta herramienta ofrece beneficios significativos. Permite la colaboración remota con expertos ubicados en continentes distantes, lo que facilita la evaluación de activos a distancia. Además, puede ser utilizada para la capacitación del personal técnico en entornos virtuales antes de llevar a cabo trabajos en el terreno.



*Ilustración 1-7: Representación de una reunión virtual. “Imagen de Freepik”*

Antes de concluir con las tecnologías, es importante destacar la relevancia de la Confiabilidad Humana. Todas estas metodologías deben entenderse dentro del marco de la Confiabilidad Humana, lo que significa que no funcionarán ni se implementarán de manera independiente. Se requiere la interacción humana en el entorno físico-virtual y la conducta humana ya forma parte integral de este amplio proceso, siendo un tema crucial para tener en cuenta en toda empresa u organización.

1.3.9 Confiabilidad Humana:

**Confiabilidad Humana:** Además la confiabilidad humana es un tema de gran importancia en la industria, si bien no encontramos en un momento en el que las máquinas desempeñan un papel fundamental en el trabajo. Sin embargo, el error humano sigue presente en todas las etapas del ciclo de vida de una instalación. De hecho, en la literatura especializada, se estima que el error humano es la causa del 70% de los accidentes en la industria, una cifra significativamente alta que requiere un análisis profundo.

Swain definió la Confiabilidad Humana como la probabilidad de que una persona realice de manera correcta las tareas requeridas por el sistema, en el momento adecuado y sin llevar a cabo actividades ajenas que puedan degradar el sistema.

La Confiabilidad Humana es un factor de gran relevancia en la industria, y su consideración es esencial al buscar mejoras. En este contexto, se puede utilizar este factor para mejorar el rendimiento de los trabajadores, especialmente a través de la formación y la capacitación. Contar con un personal altamente capacitado permite gestionar de manera más efectiva los riesgos. Además, es fundamental centrarse en aspectos como la colaboración, la comunicación y las sesiones de mejora continua. Estos esfuerzos contribuyen a fomentar una cultura organizacional que abraza el cambio y está dispuesta a adoptar mejoras en todos los niveles de la organización.

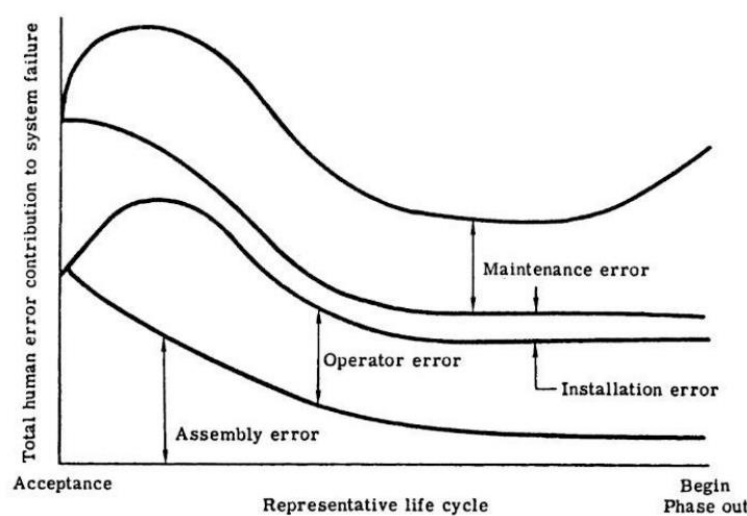


*Ilustración 1-8: Distribución de tipos de error en el ciclo de vida una instalación. “Extracto extraído desde: Consideraciones para el Desarrollo de un Modelo de Análisis de Confiabilidad Humana (HRA) Orientado a la Seguridad en el Trabajo de Mantenimiento*

Concluyendo con las tecnologías que ofrece la industria 4.0, a continuación, se presenta la introducción a la herramienta de diagnóstico AMORMS 4.0, una iniciativa que se basa en la Auditoría AMORMS y se integra de manera coherente con el Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM). Esta propuesta tiene como objetivo principal la creación de una herramienta de diagnóstico que permita evaluar los niveles de digitalización de la empresa y su compromiso con la implementación de nuevas tecnologías. exploraremos en detalle la conceptualización, el diseño y la implementación de esta herramienta, así como su relevancia en el contexto del mantenimiento industrial. Durante cada fase del MGM, se realizarán recomendaciones específicas sobre la tecnología más adecuada. Posteriormente, profundizaremos en cada fase, buscando la retroalimentación de expertos en mantenimiento para asegurarnos de que las preguntas sean pertinentes y que el enfoque tecnológico esté alineado con el caso de estudio. Este proceso permitirá garantizar que la propuesta de auditoría esté en concordancia con los principios de la Auditoría AMORMS y sea congruente con el Modelo de Gestión de Mantenimiento.

1.4 INTRODUCCIÓN A LA HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO AMORMS 4.0

Para iniciar la propuesta de la herramienta de diagnóstico, daremos nombre a sus principales pilares, los cuales son la auditoría tradicional de gestión de mantenimiento AMORMS, basada en el Modelo de Gestión de Mantenimiento de las 8 fases.

El enfoque de esta herramienta radica en facilitar la evaluación de las diversas tecnologías que ofrece la industria 4.0, con especial énfasis en su aplicación en el ámbito de la gestión del mantenimiento industrial.

Para lograrlo, se propondrá el MGM de las 8 fases con la integración de las tecnologías de la industria 4.0 (Ver ilustración 1-9) que podrían generar el mayor aporte según la investigación realizada. En cada una de estas fases, se plantea un conjunto de preguntas que nos ayudarán a evaluar los aspectos principales de la digitalización de la industria 4.0 en un proceso de gestión del mantenimiento. Además, se sugerirán las tecnologías viables para su implementación en cada fase de dicho modelo.

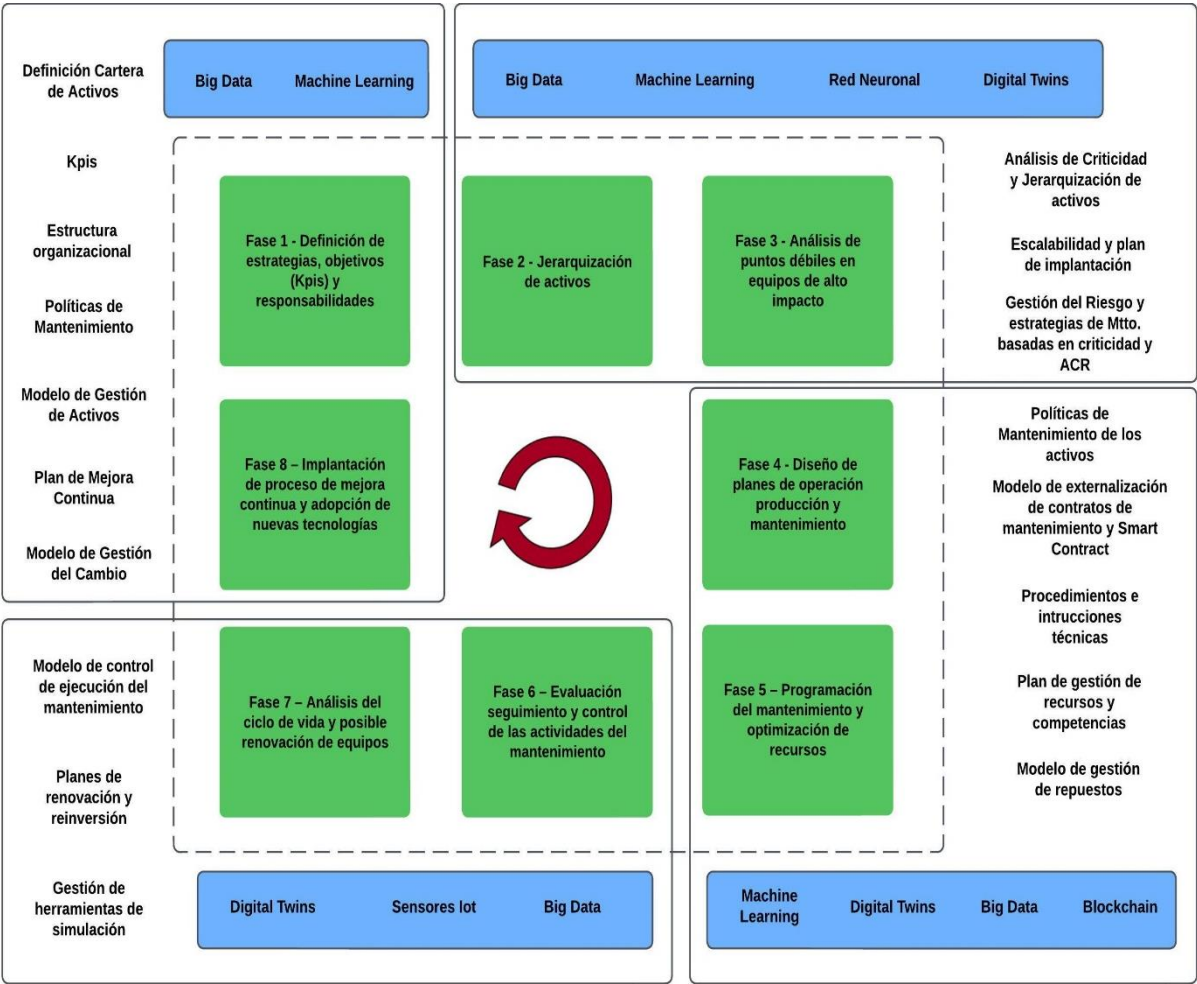


Ilustración 1-9: Propuesta Modelo de Gestión de Mantenimiento con la integración de la industria 4.0. Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que las tecnologías mencionadas son sugerencias en función a su adaptación con las distintas fases del MGM para contribuir a la gestión del mantenimiento y se basan en el estudio bibliográfico realizado en el capítulo anterior. Con el tiempo, pueden surgir nuevas tecnologías o formas más sencillas de aplicarlas. Por lo tanto, el

trabajo queda abierto a actualizaciones con mejoras o reediciones con el fin de ampliar las tecnologías y los campos de evaluación. Concluyendo, se ponen a disposición las fases y sus respectivas tecnologías.

#### 1.4.1 Fase 1 - Definición de estrategias, objetivos (KPIs) y responsabilidades

En la Fase 1, se establecen los cimientos para una gestión de mantenimiento efectiva. Esto incluye definir la estructura organizacional del área de mantenimiento, asignar responsabilidades y roles en un organigrama, así como determinar las habilidades necesarias. Además, se identifican los procesos de mantenimiento que se llevarán a cabo, desde la planificación hasta la ejecución y seguimiento. Se plantean objetivos realistas y alineados con la estrategia global de la organización. También se implementan indicadores técnicos clave, como el Tiempo Medio para la Falla (MTTF), el Tiempo Medio de Reparación (MTTR), las Tasas de Falla (FF), el Tiempo Medio fuera de servicio (MDT), la Disponibilidad y los Costos de Falla (CIF). Estos indicadores son fundamentales para evaluar el rendimiento del mantenimiento y la confiabilidad de los activos. Esta fase sienta las bases para un sistema de gestión de mantenimiento sólido y alineado con los objetivos del negocio.

Se plantea el **Big data en conjunto con el Machine Learning** como posibles tecnologías de incorporación dentro de la fase 1 con el fin de poder analizar la información recopilada, poder identificar patrones y generar objetivos alineados con las metas de la organización.

#### 1.4.2 Fase 2 - Jerarquización de activos

Dentro de esta etapa, el objetivo principal es jerarquizar los activos según su nivel de criticidad. En esencia, se busca establecer una prioridad para los activos, clasificándolos desde los más críticos hasta los menos críticos. La criticidad se refiere al grado de riesgo que un activo representa para la empresa (puede estar basado en Costes por Penalización de Producción, SHA y Costes por MTTO. correctivo.), esta jerarquización facilita la priorización de las actividades de mantenimiento. Para llevar a cabo este proceso, se pueden emplear diversas herramientas, como el diagrama de dispersión logarítmica (Jack Knife) o el diagrama de Pareto. Sin embargo, si la empresa carece de una base de datos históricos, podría optar por utilizar una matriz cualitativa de riesgo, basada en la experiencia y conocimiento de los trabajadores para asignar niveles de criticidad a los activos.

Se pueden aprovechar diversas tecnologías, como el análisis de datos masivos (**Big Data**). Mediante el análisis de datos históricos de los activos y la integración de esta

tecnología con sistemas de **Machine Learning**, es posible jerarquizar los activos según el riesgo que representen para la empresa. Asimismo, la combinación de **Big Data** con la tecnología de Gemelos Digitales (**Digital Twins**) puede generar una simulación interesante, permitiendo visualizar las posibles consecuencias futuras de los activos. Esto facilita la identificación de los activos más críticos.

#### 1.4.3 Fase 3 - Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto

La fase 3, se enfoca en el análisis de posibles fallos recurrentes en los puntos débiles de equipos o sistemas de alto impacto. Es recomendable contar con un procedimiento estandarizado que permita llevar a cabo un análisis de fallos de manera sistemática. Una técnica efectiva para este propósito es el Análisis de Causa Raíz (ACR). Esta técnica no solo beneficia al área de mantenimiento, sino que también involucra a otros departamentos como producción y calidad, permitiendo así abordar la reducción de fallos recurrentes con alto impacto de manera integral en toda la empresa.

Para esta fase se podría utilizar el **Big Data** como analista de datos. Esto puede incluir la creación de una **Red Neuronal** que permita evaluar posibles puntos débiles en los equipos. Además, es factible generar un algoritmo de **Machine Learning** para buscar patrones de fallas y debilidades en los activos.

#### 1.4.4 Fase 4 - Diseño de planes de operación, producción y mantenimiento

El objetivo principal de esta fase es desarrollar planes de mantenimiento preventivo para sistemas o activos específicos, con el propósito de reducir los costos de mantenimiento correctivo. En esta etapa, es fundamental definir las funciones, identificar los modos de falla y establecer estrategias de mantenimiento efectivas y eficientes. Una metodología ampliamente utilizada para lograr estos objetivos es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

**Big data, Machine Learning, Digital Twins:** Mediante Big data y Machine Learning evaluar y analizar los planes de mantenimiento, considerando las variables de producción y costos. Otra opción sería mediante los Digital Twins, simular planes de mantenimiento, producción y operación.

#### 1.4.5 Fase 5 – Programación del mantenimiento y optimización de recursos

En esta fase, se emplean técnicas que permiten optimizar los planes y programas de mantenimiento, con el objetivo de que sean lo más efectivos y eficientes posible. Esta optimización busca encontrar la combinación ideal de tareas de mantenimiento, su

frecuencia de ejecución y la asignación de recursos, con el fin de prolongar el ciclo de vida del activo y minimizar los costos asociados. Una metodología que puede resultar útil para lograr estos objetivos es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

**Big Data, Machine Learning, Digital Twins, Blockchain:** Mediante el uso de Big Data y Machine Learning, es posible programar y planificar los planes de mantenimiento de manera eficiente, teniendo en cuenta las variables de producción y costos. Otra opción sería utilizar Digital Twins para simular planes de mantenimiento, producción y operación. Por último, se podrían generar Smart Contracts mediante la tecnología Blockchain, con el fin de gestionar la demanda de inventario relacionada con costos y beneficios.

#### 1.4.6 Fase 6 – Evaluación seguimiento y control de las actividades del mantenimiento

Dentro de la fase 6 se establecen sistemas y procesos para supervisar las operaciones de mantenimiento realizadas. El objetivo principal es garantizar que todas las actividades del área de mantenimiento se ejecuten de manera correcta y eficiente. También se busca verificar el cumplimiento de los indicadores de rendimiento del mantenimiento previamente definidos.

Una herramienta valiosa para llevar a cabo esta tarea es Power BI. Esta plataforma de análisis de datos proporciona la capacidad de recopilar, analizar y visualizar datos en tiempo real. Con Power BI, es posible crear cuadros de mando interactivos que permiten a los responsables del mantenimiento monitorear el rendimiento de los activos, identificar tendencias y tomar decisiones basadas en datos. Además, facilita la generación de informes y análisis detallados que respaldan la toma de decisiones informadas.

**Big Data, Iot:** La integración de **IoT** y **Big Data** brinda una solución para el mantenimiento. Los sensores **IoT** recopilan datos en tiempo real de activos y equipos, que se almacenan y procesan en plataformas de **Big Data** para análisis avanzados. A través de una aplicación que permita visualizar estos datos en paneles interactivos, se facilitará el monitoreo en tiempo real y la identificación de problemas. Además, se realizan análisis predictivos para programar el mantenimiento preventivo y se establecen alertas en tiempo real para respuestas más rápidas. La combinación de estas tecnologías mejora la eficiencia y confiabilidad de los activos, reduce los costos y respalda la toma de decisiones basada en datos para el mantenimiento.

#### 1.4.7 Fase 7 - Análisis del ciclo de vida y posible renovación de equipos

En la Fase 7, se abordan los aspectos económicos de diversos activos a través del análisis del ciclo de vida. Este análisis permite calcular el costo total que un activo

incurrirá a lo largo de su vida útil. El propósito de este enfoque es tomar decisiones informadas, como la renovación del equipo, la realización de mantenimiento mayor o incluso la posibilidad de un rediseño. En este análisis se consideran tanto los costos directos como los costos indirectos.

**Big data, Digital Twins y Iot:** Mediante la combinación de estas tecnologías podemos tener un proceso de recopilación, análisis y simulación de datos. En base a lo anterior, se puede generar un informe exhaustivo sobre la durabilidad de cada activo, y se pueden simular escenarios de sustitución y remodelación. A partir de esta información, se puede tomar la decisión que se estime más conveniente.

#### 1.4.8 Fase 8 – Implantación de proceso de mejora continua y adopción de nuevas tecnologías

En esta fase, se engloban todos los resultados y hallazgos de las fases anteriores con el objetivo de implementar mejoras continuas. El propósito fundamental es la búsqueda constante de oportunidades de mejora, identificando ineficiencias en los procesos, reduciendo costos, mejorando indicadores y adoptando tecnologías emergentes.

**Big data, Machine Learning:** Para englobar todo lo que hemos visto a lo largo de las diferentes fases, es recomendable contar con un algoritmo de **Big Data** que nos permita filtrar datos específicos necesarios para respaldar diversas áreas en las que puedan surgir ineficiencias. En este sentido, el **Machine Learning** se convierte en un gran aliado para analizar estos datos y, a partir de ellos, generar soluciones para enfrentar cualquier desafío en las distintas etapas. Esto contribuirá tanto directa como indirectamente al proceso de mejora continua, ya que el análisis constante de las fases generará retroalimentación continua. Además, es fundamental explorar cómo el **Big Data** y el **Machine Learning** pueden integrarse con los datos disponibles en el mercado para identificar posibles tecnologías que puedan implementarse en la empresa.

Finalizando con el primer capítulo en donde se pudo identificar, analizar y plantear cómo se pueden implementar las tecnologías de la industria 4.0 en un modelo de gestión del mantenimiento, abre paso al desarrollo del siguiente capítulo el cual buscará hacer énfasis en el desarrollo de las bases para la aplicación de la herramienta AMORMS 4.0.

**CAPÍTULO 2: PROPUESTA DE DESARROLLO DE LA  
HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO “AMORMS 4.0”**

## **2.1 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO AMORMS 4.0**

A continuación, se presenta la estructura general de la herramienta AMORMS 4.0. El desarrollo de la herramienta AMORMS 4.0, se inicia con la elaboración de un cuestionario guía de 38 preguntas que permiten evaluar los aspectos de la Industria 4.0 asociados a las 8 fases del MGM. El cuestionario diseñado, propone una escala de evaluación del 1 al 5 y genera resultados que permiten evaluar el nivel de madurez con respecto al uso de herramientas de la Industria 4.0 en cada una de las fases del MGM. Estos niveles consisten en lo siguiente:

Nivel I: La empresa no aborda el sector de la industria 4.0. Tiene una cultura organizacional poco innovadora, no se ha asignado presupuesto para la implementación y no posee un plan claro de cómo abordar la transformación digital. - **(La empresa no aborda el sector de la industria 4.0.)**

Nivel II: La empresa tiene participación en temas de la industria 4.0. Comenzó con una iniciativa para la implementación de la industria 4.0, pero no posee una estrategia clara para su implementación. Le han asignado recursos, pero no son lo suficiente para generar una solución completa. - **(La empresa tiene participación en temas de la industria 4.0.)**

Nivel III: La empresa implemento requerimientos de la industrialización 4.0 de forma eficiente y ha conseguido optimizar ciertos flujos de la información y procesos, pero aún no se han podido integrar completamente en los procesos de la empresa. Poseen un buen presupuesto, en conjunto de un personal capacitado. -**(La empresa implemento factores de la industria 4.0.)**

Nivel IV: La empresa ha implementado tecnologías avanzadas de forma eficiente y posee un gran manejo de las herramientas de la industria 4.0, poseen una cultura organizacional innovadora, con personal altamente capacitado y comprometido, logrando mejoras significativas en la eficiencia y la productividad. Se encuentran en constante persecución de nuevas tecnologías que les permitan mejorar. -**(La empresa implemento tecnologías avanzadas de forma eficiente y posee un gran manejo de las herramientas de la industria 4.0.)**

Nivel V: La empresa es un gran referente de la industria 4.0, ha implementado tecnologías avanzadas de forma eficiente y de manera óptima, se encuentra en constante evolución para mejorar sus procesos e imparte constantemente cursos y charlas sobre la industria 4.0 y nuevas tecnologías a su personal, poseen una cultura organizacional

altamente innovadora, además de ser considerada una empresa líder en su sector. **-(La empresa es referente de la industria 4.0.)**

A continuación, se presentan las preguntas que permitirán evaluar cómo se encuentra la organización en el área del mantenimiento con respecto al uso de técnicas digitales en las distintas fases del Modelo de Gestión de Mantenimiento adaptado a la industria 4.0.

#### 2.1.1 Cuestionario: Evaluación digital 4.0

### **1. Fase 1 - Definición de estrategias, objetivos (Kpis) y responsabilidades**

#### 1.1 Soporte digital para el área administrativa de mantenimiento

- 1.1.1. ¿La empresa tiene una estrategia de transformación digital clara en el área de mantenimiento?
- 1.1.2. ¿La empresa utiliza análisis de datos avanzados para tomar decisiones estratégicas en la gestión de activos?
- 1.1.3. ¿La empresa cuenta con una plataforma de análisis de datos integrado a un sistema de mantenimiento preventivo?
- 1.1.4. ¿Existe una plataforma de colaboración digital que permita a los equipos compartir información y conocimientos para la planificación estratégica?

### **2. Fase 2 - Modelo de jerarquización de activos**

#### 2.1 Soporte digital de modelos de jerarquización basado en riesgo

- 2.1.1. ¿Se emplean algoritmos de Machine Learning para analizar patrones y tendencias en datos relacionados con las frecuencias y consecuencias de fallas de los activos de la planta?
- 2.1.2. ¿Se integran datos de diferentes activos para generar una visión integral de la jerarquización de activos?
- 2.1.3. ¿Los modelos digitales permiten evaluar el estado de los activos y su impacto en tiempo real en caso de posibles fallas?
- 2.1.4. ¿Se emplean Gemelos Digitales para simular posibles consecuencias futuras de los activos?

### **3. Fase 3 - Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto**

#### 3.1 Procesos de digitalización para el análisis de fallas

- 3.1.1. ¿La empresa recopila y almacena grandes volúmenes de datos, incluidos datos de fallas, de los equipos y activos a través de sensores y sistemas de monitoreo?
- 3.1.2. ¿Se utilizan herramientas de visualización de datos de fallas para presentar los resultados del análisis de Big Data de manera comprensible para los equipos de mantenimiento?
- 3.1.3. ¿La empresa utiliza algoritmos de Machine Learning para analizar datos recopilados mediante Big Data y pronosticar patrones que puedan indicar posibles modos de fallos en los equipos?
- 3.1.4. ¿La empresa dispone de una herramienta que permita automatizar el proceso de análisis de fallas y, en caso afirmativo, esta herramienta tiene conexión directa con algoritmos de Machine Learning o Redes Neuronales?
- 3.1.5. ¿La empresa emplea herramientas como gemelos digitales o realidad aumentada en los procesos de validación de hipótesis?
- 3.1.6. ¿La empresa implementa herramientas digitales para llevar a cabo la evaluación y seguimiento del impacto de sus operaciones o proyectos?

#### **4. Fase 4 - Diseño de planes de operación producción y mantenimiento**

4.1 Procesos de digitalización para la programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento

- 4.1.1. ¿La empresa cuenta con una plataforma de análisis de datos escalable y de fácil integración para procesos de planificación y programación en los sistemas existentes en el área de mantenimiento?
- 4.1.2. ¿La plataforma de gestión del mantenimiento utilizada permite la captura, procesamiento y análisis exhaustivo de información relacionada con las distintas fallas del sistema (RCM, AMEF), además de facilitar el acceso remoto a los modelos de Digital Twins para su análisis y simulación desde diferentes ubicaciones, y la optimización de estrategias de mantenimiento?
- 4.1.3. ¿Se utilizan herramientas digitales para optimizar la estrategia de mantenimiento y los tiempos de inactividad?
- 4.1.4. ¿La empresa utiliza plataformas de Big Data para recopilar, almacenar y procesar datos relevantes de producción, operación y mantenimiento?
- 4.1.5. ¿La empresa posee una herramienta que permita simular las consecuencias (Seguridad, ambiente, producción y costos) de los diferentes modos de fallos?

#### **5. Fase – 5 Optimización de la operación, producción y el mantenimiento**

## 5.1 Herramientas de soporte informático enfocado en la digitalización

- 5.1.1. ¿La empresa tiene en marcha proyectos piloto que aprovechan Machine Learning para mejorar la eficiencia de las operaciones?
- 5.1.2. ¿Se utilizan algoritmos de Machine Learning para analizar los datos relacionados a los costos de las estrategias de mantenimiento que ayuden a optimizar los presupuestos de mantenimiento?
- 5.1.3. ¿La empresa integra los Smart Contract en función de la demanda del inventario, vinculando costos beneficios?
- 5.1.4. ¿La empresa utiliza herramientas para optimizar los procesos logísticos relacionados con los repuestos, en sus planes de mantenimiento?
- 5.1.5. ¿La empresa posee una herramienta que permita vincular las frecuencias de mantenimiento con los repuestos? (ejemplo: IBM máximo, SAP PM, eMaint)

## 6. Fase - 6 Evaluación seguimiento y control

### 6.1 Herramientas digitales para facilitar el análisis de indicadores

- 6.1.1. ¿La empresa recopila y almacena datos detallados sobre cambios y eventos en los procesos técnicos, de manera automatizada, como los tiempos medios para falla (MTTF), los tiempos medios para reparación (MTTR) y las tasas de falla (FF)?
- 6.1.2. ¿Se utilizan herramientas de análisis de Big Data para procesar y analizar esta información con el objetivo de evaluar el desempeño de los indicadores de mantenimiento?
- 6.1.3. ¿La empresa utiliza herramientas para predecir comportamientos y ajustar de forma automática la frecuencia de ejecución de mantenimiento basadas en tiempo por condición?
- 6.1.4. ¿La empresa posee herramientas que permitan integrar el análisis de indicadores técnicos con los indicadores asociados a costos del mantenimiento?
- 6.1.5. ¿La empresa posee una plataforma digital que permita crear una base de datos totalmente automatizada? Ejemplo: Generar un benchmarking de los activos operando en planta (asociando indicadores técnicos y de costos de mantenimiento)
- 6.1.6. ¿Utilizan plataforma de simuladores RAM o de simulación sistémica dentro de los distintos sistemas de la empresa?

## **7. Fase – 7 Análisis del ciclo de vida y posible renovación de equipos**

### **7.1 Herramientas digitales para facilitar el análisis del costo de ciclo de vida**

- 7.1.1. ¿La empresa utiliza algoritmos de Machine Learning que permitan analizar el LCCA de un activo de forma automática?
- 7.1.2. ¿Se emplean herramientas como los Gemelos Digitales para simular diferentes escenarios de durabilidad y desempeño de los activos a lo largo del tiempo?
- 7.1.3. ¿La empresa utiliza tecnologías de simulación avanzada para modelar el comportamiento y el desempeño de los activos en diferentes condiciones operativas?
- 7.1.4. ¿Se emplean tecnologías como los Gemelos Digitales para simular diferentes escenarios de durabilidad y desempeño de los activos a lo largo del tiempo?

## **8. Fase – 8 Implantación de proceso de mejora continua y adopción de nuevas tecnologías**

### **8.1 Programa de digitalización**

- 8.1.1. ¿Está la dirección dispuesta a invertir en tecnologías avanzadas y liderar la transformación digital en los procesos de mantenimiento?
- 8.1.2. ¿Se cuenta con una estrategia de inversión a largo plazo para la transformación digital en los procesos de mantenimiento de la empresa?
- 8.1.3. ¿La empresa cuenta con una herramienta que permita identificar las áreas de oportunidad de mejora en el área de mantenimiento?
- 8.1.4. ¿La empresa cuenta con un proceso de adaptación cultural que se vincule a los continuos cambios que propone hoy en día las innovaciones tecnológicas en el área de mantenimiento? (Manejo del cambio)

#### **2.1.2 Desarrollo de la herramienta AMORMS 4.0**

La herramienta de diagnóstico AMORMS 4.0, abarca el cuestionario completo de la auditoría AMORMS con la inclusión de un cuestionario que pueda evaluar el provecho que le estén sacando a las distintas herramientas digitales de las empresas. Además, se incorpora una pregunta a la AMORMS tradicional con el fin de conocer si existe la incorporación de las tecnologías de la industria 4.0 en el proceso de mejora continua. A continuación, se explicará su procedimiento y su presentación de datos en base a gráficos para comprender en qué áreas la empresa se destaca y dónde se encuentran las mayores oportunidades de mejoras. Como se explicó anteriormente la herramienta AMORMS 4.0 adapta el Modelo de Gestión de Mantenimiento a las nuevas tendencias de la industria 4.0.

En base a lo dictado en la introducción de la AMORMS 4.0 se plantea el siguiente procedimiento.

2.1.3 Procedimiento AMORMS 4.0

El proceso de aplicación de esta herramienta se llevará a cabo desde el nivel de supervisión hacia arriba, involucrando al menos a 8 personas, incluyendo supervisores, ingenieros, superintendentes y gerentes. El análisis de las 8 áreas a diagnosticar se realiza mediante dos cuestionarios AMORMS y 4.0 con 151 y 38 preguntas respectivamente, dando un total de 189 preguntas las cuales se presentan a continuación.

A continuación, se explica brevemente como se debe responder el cuestionario:

Cada participante evaluará estas preguntas asignando puntuaciones que varían de 1 a 5, según las siguientes escalas:

Para el caso del cuestionario tradicional de gestión de mantenimiento AMORMS, la escala va en el siguiente orden:

- [1] Proceso muy deficiente
- [2] Proceso debajo del promedio
- [3] Proceso estándar promedio
- [4] Proceso con muy buenas prácticas
- [5] Proceso a nivel de Clase Mundial

Tabla 2-2 Puntaje Auditoría AMORMS

| Puntaje inicial | Descripción del proceso          | Escala  |
|-----------------|----------------------------------|---------|
| 1               | Proceso muy deficiente           | 1,0-1,5 |
| 2               | Proceso debajo del promedio      | 1,6-2,5 |
| 3               | Proceso estándar promedio        | 2,6-3,5 |
| 4               | Proceso con muy buenas practicas | 3,6-4,5 |
| 5               | Proceso a nivel de clase mundial | 4,5-5   |

Mientras que para la evaluación digital correspondiente al cuestionario 4.0 se dictaran los siguientes niveles de madurez:

- [1] Nivel I: La empresa no aborda el sector digital 4.0.
- [2] Nivel II: La empresa tiene participación en temas del sector digital 4.0.
- [3] Nivel III: La empresa implemento factores del sector digital 4.0.
- [4] Nivel IV: La empresa implemento tecnologías avanzadas del sector digital 4.0.
- [5] Nivel V: La empresa es un gran referente de la industria 4.0.

Tabla 2-3 Puntaje evaluación Digital 4.0

| Puntaje inicial | Descripción del nivel                                               | Escala  |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|---------|
| 1               | La empresa no aborda el sector digital 4.0                          | 1,0-1,5 |
| 2               | La empresa tiene participación en temas del sector digital 4.0      | 1,6-2,5 |
| 3               | La empresa implemento factores del sector digital 4.0               | 2,6-3,5 |
| 4               | La empresa implemento tecnologías avanzadas del sector digital 4.0. | 3,6-4,5 |
| 5               | La empresa es un gran referente de la industria 4.0                 | 4,5-5   |

Una vez que responda a las preguntas podrá ver 2 gráficos de tipo radial correspondientes a los cuestionarios AMORMS y Evaluación Digital 4.0 en el respectivo orden. (ver ilustraciones 2-10 y 2-11.)

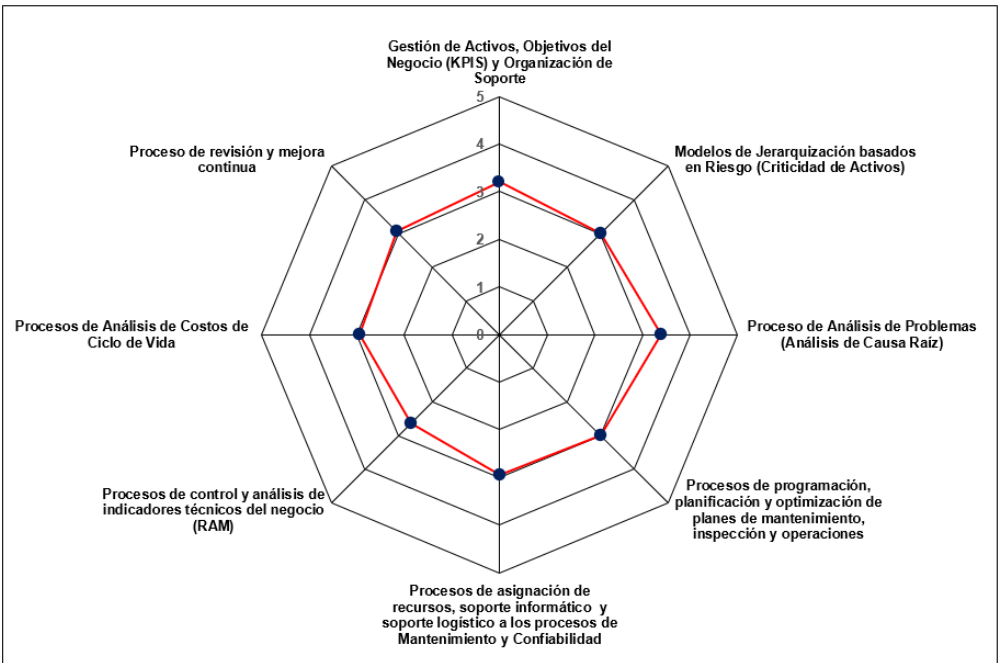


Ilustración 2-10: Gráfico Auditoría AMORMS. Fuente: Elaboración propia

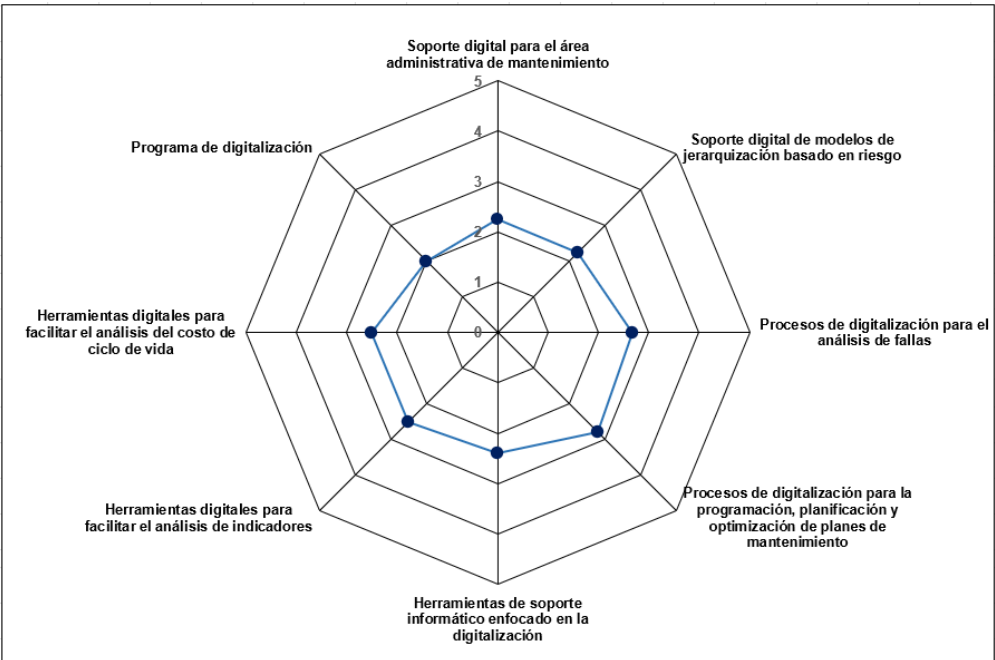


Ilustración 2-11: Gráfico evaluación digital (4.0). Fuente: Elaboración propia

Estos gráficos se generan con el fin de poder dar a conocer los datos de forma rápida y sencilla.

A continuación, se presenta un ejemplo ilustrativo de la herramienta de diagnóstico AMORMS 4.0:

2.2.4 Ejemplo Ilustrativo

Para comenzar se cuenta con un archivo Excel en donde cada persona debe rellenar la primera página con sus datos (Nombre empresa, nombre de la persona, cargo, fecha, área industrial)

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Nombre de la empresa:</b> |  |
| <b>Nombre Persona:</b>       |  |
| <b>Cargo:</b>                |  |
| <b>Fecha:</b>                |  |
| <b>Area Industrial:</b>      |  |

Luego el Trabajador de la empresa debe responder el cuestionario en Excel con las dos hojas llamadas AMORMS y 4.0, hecho lo anterior se genera un gráfico tipo radial para cada uno de los casos evaluados, en este caso AMORMS y 4.0.

La escala de evaluación de la Auditoría AMORMS sugiere los siguientes niveles:

- 1. Proceso muy deficiente
- 2. Proceso debajo del promedio
- 3. Proceso estándar promedio
- 4. Proceso de muy buenas practicas
- 5. Proceso a nivel de clase mundial

Mientras que la escala de evaluación digital sugiere:

- I. La empresa no aborda el sector de la industria 4.0
- II. La empresa tiene participación en temas de la industria 4.0
- III. La empresa implemento factores relevantes de la industria 4.0
- IV. La empresa implemento tecnologías avanzadas de forma eficiente y posee un gran manejo de las herramientas de la industria 4.0
- V. La empresa es referente de la industria 4.0

Realizadas las respuestas del personal se generan los siguientes gráficos y tablas (ver ilustraciones 2-12, 2-13 y ver tablas 2-4 y 2-5).

El siguiente grafico representa la evaluación de la auditoría AMORMS ver ilustración 2-12.

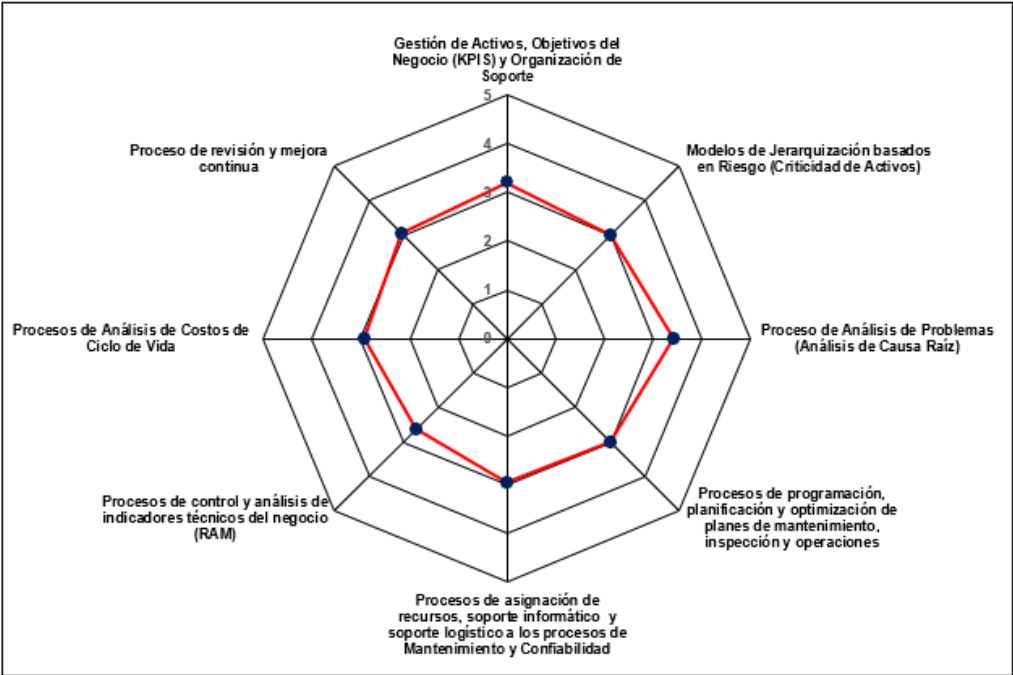


Ilustración 2-12: Gráfico tipo radial Auditoría AMORMS. Fuente: Elaboración propia

Dentro de este gráfico, podemos ver que el caso de ejemplo está en un punto intermedio en sus prácticas y procesos, con un progreso constante hacia prácticas más avanzadas. Es importante notar que, al observar el proceso de control y análisis de los indicadores técnicos del negocio, es evidente que hay espacio para mejorar. Esto sugiere que, si la empresa se enfoca en mejorar estas operaciones y cómo evalúa la información, puede aumentar su rendimiento general y alcanzar un nivel más alto en su industria.

La siguiente tabla muestra las puntuaciones obtenidas en las distintas fases del Modelo de Gestión de mantenimiento, abarcando tanto la Auditoría de mantenimiento AMORMS como el enfoque a la industria 4.0

Tabla 2-4 Evaluación AMORMS 4.0

|        |                                                                                                                             |      |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Fase 1 | Gestión de Activos, Objetivos del Negocio (KPIs) y Organización de Soporte                                                  | 3,04 |
| Fase 2 | Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (Críticidad de Activos)                                                         | 2,81 |
| Fase 3 | Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz)                                                                   | 3,22 |
| Fase 4 | Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones                 | 2,96 |
| Fase 5 | Procesos de asignación de recursos, soporte informático y soporte logístico a los procesos de Mantenimiento y Confiabilidad | 2,84 |
| Fase 6 | Procesos de control y análisis de indicadores técnicos del negocio (RAM)                                                    | 2,62 |
| Fase 7 | Procesos de Análisis de Costos de Ciclo de Vida                                                                             | 2,78 |
| Fase 8 | Proceso de revisión y mejora continua                                                                                       | 2,80 |

La Tabla 2-4 refleja la evaluación general de la empresa utilizando la herramienta de diagnóstico AMORMS 4.0. la empresa de ejemplo está situada por debajo de lo que se consideraría un proceso estándar promedio. A continuación, procederemos a realizar un análisis breve de la fase con la calificación más baja para identificar sus posibles puntos débiles y proponer posibles soluciones. Se tomarán en consideración las siguientes preguntas:

|       |                                                                                                                                                                                         |   |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 6.1.1 | ¿Existe un proceso de eficiente de registro de la información histórica de los equipos?                                                                                                 | 3 |
| 6.1.2 | ¿Se realizan de forma eficiente análisis de mejora sobre la información histórica de fallas y operación de los equipos?                                                                 | 2 |
| 6.1.3 | ¿Existe un programa estándar de análisis de indicadores implementado de forma eficiente?                                                                                                | 2 |
| 6.1.4 | ¿Se realizan análisis sistemáticos de fallas a partir de indicadores de riesgo previamente definidos?                                                                                   | 3 |
| 6.1.5 | ¿La organización evalúa y toma decisiones a partir de indicadores de mejora en confiabilidad y mantenibilidad de forma eficiente? (MTTF, MTTR, Disponibilidad, etc.)                    | 2 |
| 6.3.1 | ¿Existe un procedimiento dónde se detallen los procesos operacionales?                                                                                                                  | 2 |
| 6.3.3 | ¿Se relaciona las estrategias operacionales con las estrategias del mantenimiento?                                                                                                      | 3 |
| 6.3.4 | ¿Están vinculadas de forma eficiente las metas operacionales con la planificación de las actividades de mantenimiento?                                                                  | 2 |
| 6.3.5 | ¿Están integradas las estrategias de operación y producción con los procesos de programación y planificación del mantenimiento?                                                         | 1 |
| 6.4.1 | ¿El uso de contratistas es eficiente y se tienen modelos de contratos establecidos por áreas y tipos de trabajo?                                                                        | 2 |
| 6.4.2 | ¿Los contratos de corto y largo plazo están totalmente estandarizados?                                                                                                                  | 3 |
| 6.4.3 | ¿Existe un proceso de validación y auditoría de las credenciales de las contratistas que participan en los diferentes procesos de mantenimiento y operación?                            | 2 |
| 6.4.4 | ¿Existen un proceso eficiente de evaluación del desempeño real de los contratistas, que sea constantemente monitoreado y que permita tomar acciones sobre las desviaciones encontradas? | 2 |
| 6.4.5 | ¿Los contratos de negocios establecidos con los contratistas están totalmente alineados en términos de estrategias con los objetivos y metas del negocio?                               | 3 |

Dentro de lo que respecta a la fase 6 se analizan las preguntas por separado.

- **6.1.1:** Para mejorar la eficiencia en el registro de la información histórica de los equipos, es esencial establecer una herramienta y un proceso estándar que garantice la recopilación y almacenamiento de datos de manera oportuna y precisa.
- **6.1.2:** Para llevar a cabo análisis eficientes de mejora sobre la información histórica de fallas y operación de los equipos, se pueden implementar procesos de revisión sistemática de datos, identificando patrones y tendencias que lleven a acciones de mejora.
- **6.1.3:** La implementación eficiente de un programa estándar de análisis de indicadores es fundamental para evaluar el rendimiento. Asegurarse de que este

programa se ejecute de manera efectiva es crucial para la toma de decisiones informadas.

- **6.1.4:** Para realizar análisis sistemáticos de fallas a partir de indicadores de riesgo previamente definidos, es importante establecer un proceso que identifique y priorice los indicadores críticos para la confiabilidad y el mantenimiento.
- **6.1.5:** La eficiencia en la evaluación y toma de decisiones a partir de indicadores de mejora, como MTTF, MTTR y disponibilidad, requiere la implementación de herramientas de análisis de datos que proporcionen información valiosa y actualizada.

Por otra parte, en los **Procesos de control de las operaciones** se sugiere lo siguiente:

- **6.3.1:** Para garantizar la eficiencia en la documentación de los procesos operacionales, se debe establecer un procedimiento detallado que describa claramente las actividades y responsabilidades de cada proceso.
- **6.3.3:** La relación eficiente entre las estrategias operacionales y las estrategias de mantenimiento puede lograrse mediante una alineación estratégica y una comunicación efectiva entre los departamentos correspondientes.
- **6.3.4:** La vinculación eficiente de las metas operacionales con la planificación de las actividades de mantenimiento implica la coordinación de esfuerzos para asegurarse de que los objetivos se reflejen en las actividades diarias.
- **6.3.5:** La integración efectiva de las estrategias de operación y producción con los procesos de programación y planificación del mantenimiento se puede lograr estableciendo flujos de trabajo y sistemas que faciliten la colaboración entre los equipos.

En el **Control de contratistas** hay que tener en cuenta lo está a continuación:

- **6.4.1:** Para optimizar el uso de contratistas de manera eficiente, es esencial definir modelos de contratos por áreas y tipos de trabajo y garantizar que los procesos de selección se lleven a cabo de manera efectiva.
- **6.4.2:** Estandarizar completamente los contratos de corto y largo plazo puede mejorar la eficiencia en la gestión de contratistas, asegurando que las expectativas y obligaciones sean claras.
- **6.4.3:** La eficiencia en la validación y auditoría de las credenciales de los contratistas se logra mediante procesos estructurados y supervisión continua para garantizar que cumplen con los requisitos.
- **6.4.4:** Establecer un proceso eficiente de evaluación del desempeño real de los contratistas, con un monitoreo constante y acciones correctivas cuando sea necesario, es crucial para mantener altos estándares de calidad.

- **6.4.5:** Para alinear completamente los contratos de negocios con los objetivos y metas del negocio, es fundamental que los contratos se basen en estrategias compartidas y se revisen periódicamente.

Concluyendo el análisis de la encuesta AMORMS se procede a realizar lo mismo para la encuesta digital 4.0.

El siguiente grafico representa la evaluación de la digitalización en el área del mantenimiento, ver ilustración 2-13.

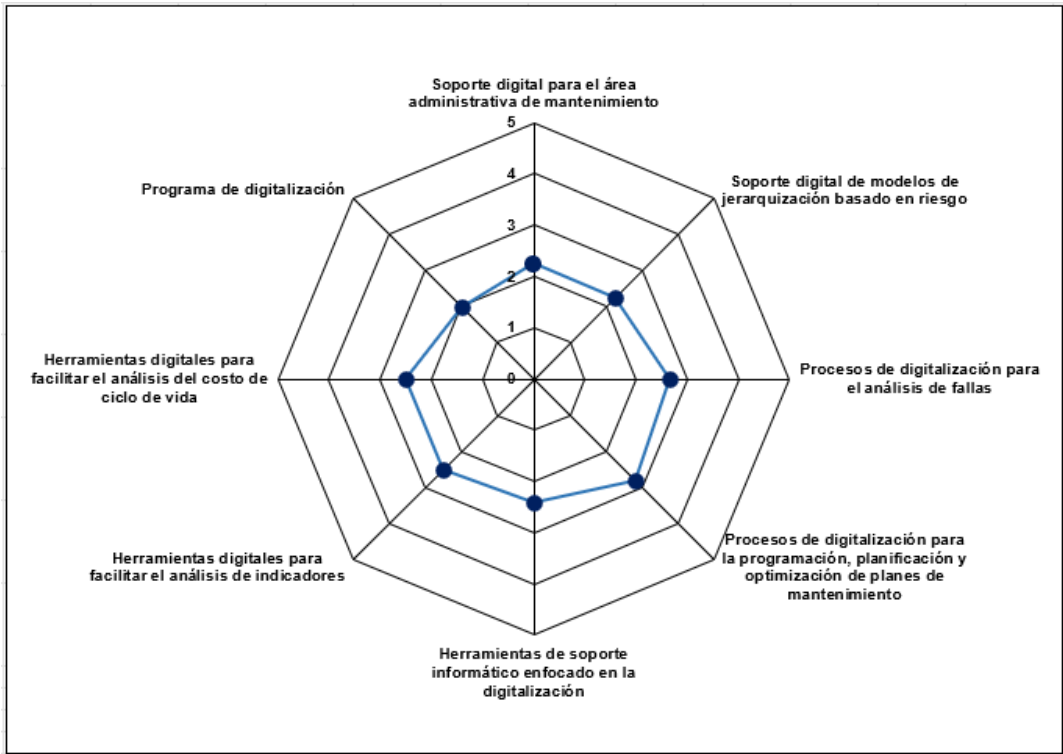


Ilustración 2-13: Gráfico tipo radial Digitalización. Fuente: Elaboración propia

En esta situación, el gráfico revela que la empresa no se encuentra en un nivel estándar en lo que respecta a las tecnologías y herramientas asociadas a la industria 4.0, pero nos sugiere que la empresa posee grandes oportunidades de mejora respecto a las tecnologías de la industria 4.0. La empresa puede aprovechar este punto de partida como una oportunidad para avanzar hacia una mayor integración de las tecnologías de la industria 4.0 y, en consecuencia, mejorar su eficiencia y competitividad en el mercado.

La siguiente tabla muestra las puntuaciones obtenidas en las distintas fases del Modelo de Gestión de mantenimiento, con el enfoque en la industria 4.0

Tabla 2-5 Evaluación digital

|        |                                                                                                          |      |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Fase 1 | Soporte digital para el área administrativa de mantenimiento                                             | 2,25 |
| Fase 2 | Soporte digital de modelos de jerarquización basado en riesgo                                            | 2,25 |
| Fase 3 | Procesos de digitalización para el análisis de fallas                                                    | 2,67 |
| Fase 4 | Procesos de digitalización para la programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento | 2,80 |
| Fase 5 | Herramientas de soporte informático enfocado en la digitalización                                        | 2,40 |
| Fase 6 | Herramientas digitales para facilitar el análisis de indicadores                                         | 2,50 |
| Fase 7 | Herramientas digitales para facilitar el análisis del costo de ciclo de vida                             | 2,50 |
| Fase 8 | Programa de digitalización                                                                               | 2,00 |

Destacamos las fases 1, 2 y 8 con la mayor oportunidad de mejora, en este caso las preguntas a tener en consideración son:

|       |                                                                                                                                                                                                       |   |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| 1.6.1 | ¿La empresa tiene una estrategia de transformación digital clara en el área de mantenimiento?                                                                                                         | 2 |
| 1.6.2 | ¿La empresa utiliza análisis de datos avanzados para tomar decisiones estratégicas en la gestión de activos?                                                                                          | 3 |
| 1.6.3 | ¿La empresa cuenta con una plataforma de análisis de datos integrado a un sistema de mantenimiento preventivo?                                                                                        | 2 |
| 1.6.4 | ¿Existe una plataforma de colaboración digital que permita a los equipos compartir información y conocimientos para la planificación estratégica?                                                     | 2 |
| 2.4.1 | ¿Se emplean algoritmos de Machine Learning para analizar patrones y tendencias en datos relacionados con las frecuencias y consecuencias de fallas de los activos de la planta?                       | 3 |
| 2.4.2 | ¿Se integran datos de diferentes activos para generar una visión integral de la jerarquización de activos?                                                                                            | 2 |
| 2.4.3 | ¿Los modelos digitales permiten evaluar el estado de los activos y su impacto en tiempo real en caso de posibles fallas?                                                                              | 2 |
| 2.4.4 | ¿Se emplean Gemelos Digitales (Digital Twins) para simular posibles consecuencias futuras de los activos?                                                                                             | 2 |
| 8.4.1 | ¿Está la dirección dispuesta a invertir en tecnologías avanzadas y liderar la transformación digital en los procesos de mantenimiento?                                                                | 2 |
| 8.4.2 | ¿Se cuenta con una estrategia de inversión a largo plazo para la transformación digital en los procesos de mantenimiento de la empresa?                                                               | 2 |
| 8.4.3 | ¿La empresa cuenta con una herramienta que permita identificar las áreas de oportunidad de mejora en el área de mantenimiento?                                                                        | 1 |
| 8.4.4 | ¿La empresa cuenta con un proceso de adaptación cultural que se vincule a los continuos cambios que propone hoy en día las innovaciones tecnológicas en el área de mantenimiento? (Manejo del cambio) | 3 |

Se puede atacar directamente estos ámbitos para encontrar posibles soluciones:

Soporte digital para el área administrativa de mantenimiento.

- **1.6.1:** Tener una estrategia de transformación digital clara es crucial, y para ello, es importante que la alta dirección participe activamente en la definición de objetivos y metas relacionadas con la digitalización del mantenimiento. Estos objetivos pueden incluir la implementación de nuevas tecnologías y la mejora de procesos.
- **1.6.2:** La utilización de herramientas de análisis de datos avanzados puede requerir nuevas inversiones en herramientas y la capacitación del personal. Es recomendable establecer un grupo de analistas o colaborar con expertos en análisis de datos para asegurar un enfoque efectivo.
- **1.6.3:** Para garantizar la integración segura de la plataforma de análisis de datos con el sistema de mantenimiento preventivo, es esencial llevar a cabo una cuidadosa evaluación y selección de estas herramientas. Asegurarse de que sean compatibles y se integren de manera efectiva con otros sistemas existentes es fundamental.
- **1.6.4:** Identificar cómo colaboran las distintas áreas de la empresa y verificar si el software de gestión de activos genera un módulo basado en la gestión del mantenimiento es esencial para promover la colaboración efectiva entre los departamentos y mejorar la gestión de activos.

Procesos de digitalización para la programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento.

- **2.4.1:** En relación con el uso de algoritmos de Machine Learning para analizar patrones y tendencias en los datos de fallas de activos, se recomienda evaluar las herramientas disponibles y formar al personal en su utilización.
- **2.4.2:** Para optimizar la integración de datos de diferentes activos, es importante verificar el sistema de recopilación de datos y asegurarse de que los datos se gestionen de manera efectiva. Identificar la herramienta utilizada para la integración de datos es crucial.
- **2.4.3:** Verificar si la empresa cuenta con un sistema de monitoreo de activos que permita el análisis en tiempo real de las consecuencias de las fallas es esencial para una gestión proactiva del mantenimiento.

- **2.4.4:** La verificación de la disponibilidad de software de simulación y modelamiento 3D es importante, y en caso de necesidad, considerar la posibilidad de colaborar con expertos en modelamiento 3D para su implementación.

Programa de digitalización.

- **8.4.1:** Para generar proyectos sólidos que demuestren el retorno de la inversión a través de las nuevas herramientas de la Industria 4.0, es fundamental definir objetivos claros y medibles, así como realizar un seguimiento continuo de los resultados.
- **8.4.2:** Es crucial verificar la estrategia de inversión en el área de mantenimiento y asegurarse de que esté alineada con el plan estratégico de la empresa. Identificar las mejores oportunidades de mejora digital en los procesos de mantenimiento y enfocarlas según el presupuesto disponible es esencial.
- **8.4.3:** La verificación de si la empresa posee una herramienta o software de análisis de madurez digital que permita identificar áreas de oportunidad de mejora es fundamental para un enfoque basado en datos y resultados.
- **8.4.4:** Al verificar cómo la empresa aborda el manejo del cambio, se debe considerar la actualización de enfoques para garantizar que sean innovadores y estén alineados con las tendencias tecnológicas actuales.

Una vez presentado el ejemplo ilustrativo para demostrar cómo funciona la herramienta de diagnóstico, continuaremos con el último capítulo dedicado a la aplicación industrial de la herramienta AMORMS 4.0.

**CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE  
DIAGNÓSTICO AMORMS 4.0**

Para dar introducción a lo que se llevara a cabo dentro de este capítulo, se plantea como objetivo principal la implementación de la herramienta de diagnóstico AMORMS 4.0 en función de cumplir con lo dictado en el objetivo número tres, además del análisis que conlleva la implementación de la herramienta. Fue desarrollada dentro de una empresa destinada al ámbito de arriendos de equipo y maquinarias, para este caso fue en la Sociedad de Arriendos de Equipos y Maquinarias MPM Limitada, en donde su taller se encuentra ubicado en el kilómetro 12 de Antofagasta y presta servicios principalmente a empresas como Spence, Centinela y Escondida.

La implementación de la AMORMS 4.0 tiene como objetivo evaluar el desempeño de los procesos de gestión de mantenimiento que existen en la empresa y en base a los resultados obtener la visión que poseen los responsables de la gestión del mantenimiento de la empresa. Para este caso, se entrevistaron a 4 personas que se desempeñan o tienen relación con el área del mantenimiento de la empresa, seguidamente se presentaran los datos y el análisis que se les género.

### **3.1. DATOS DE ENCUESTAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los datos obtenidos en base a las respuestas se analizarán a detalle y con los resultados obtenidos se podrá dar una visión del estado en el cual se encuentran los procesos actuales de mantenimiento de la empresa. En base a estos datos, en los apartados siguientes se explicarán sus ponderaciones y donde posee la mayor oportunidad de mejora la empresa, además de dar las recomendaciones a seguir para aprovechar dichas oportunidades destinadas a optimizar los procesos de mantenimiento en el ámbito de arriendo de equipos y maquinarias.

Mediante las respuestas proporcionadas por los expertos, se realizó una ponderación final que se tomó como base para llevar a cabo los análisis, conclusiones y recomendaciones. A continuación, se presentan las tablas 3-6 y 3-7 con las ponderaciones finales del cuestionario AMORMS y de la evaluación digital. Cabe destacar que se realizará un análisis por separado de ambos cuestionarios, generando recomendaciones para ambas áreas.

Tabla 3-6 Ponderación final AMORMS

|        |                                                                                                                             |      |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Fase 1 | Gestión de Activos, Objetivos del Negocio (KPIS) y Organización de Soporte                                                  | 3,24 |
| Fase 2 | Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (Críticidad de Activos)                                                         | 2,99 |
| Fase 3 | Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz)                                                                   | 2,88 |
| Fase 4 | Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones                 | 2,95 |
| Fase 5 | Procesos de asignación de recursos, soporte informático y soporte logístico a los procesos de Mantenimiento y Confiabilidad | 2,58 |
| Fase 6 | Procesos de control y análisis de indicadores técnicos del negocio (RAM)                                                    | 2,59 |
| Fase 7 | Procesos de Análisis de Costos de Ciclo de Vida                                                                             | 2,78 |
| Fase 8 | Proceso de revisión y mejora continua                                                                                       | 2,66 |



Ilustración 3-14: Gráfico tipo radial Auditoría AMORMS. Fuente: Elaboración propia en base a respuestas de expertos.

Con los resultados que se pueden observar tanto en el grafico como la tabla, se puede dar como conclusión que la empresa se encuentra en un proceso de gestión de mantenimiento estándar promedio, sin embargo, aún existen oportunidades de mejora las cuales serán destacadas más adelante.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la evaluación digital de la empresa:

Tabla 3-7 Ponderación final evaluación digital

|        |                                                                                                          |      |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Fase 1 | Soporte digital para el área administrativa de mantenimiento                                             | 2,25 |
| Fase 2 | Soporte digital de modelos de jerarquización basado en riesgo                                            | 1,50 |
| Fase 3 | Procesos de digitalización para el análisis de fallas                                                    | 1,33 |
| Fase 4 | Procesos de digitalización para la programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento | 1,50 |
| Fase 5 | Herramientas de soporte informático enfocado en la digitalización                                        | 1,60 |
| Fase 6 | Herramientas digitales para facilitar el análisis de indicadores                                         | 1,67 |
| Fase 7 | Herramientas digitales para facilitar el análisis del costo de ciclo de vida                             | 1,63 |
| Fase 8 | Programa de digitalización                                                                               | 2,88 |

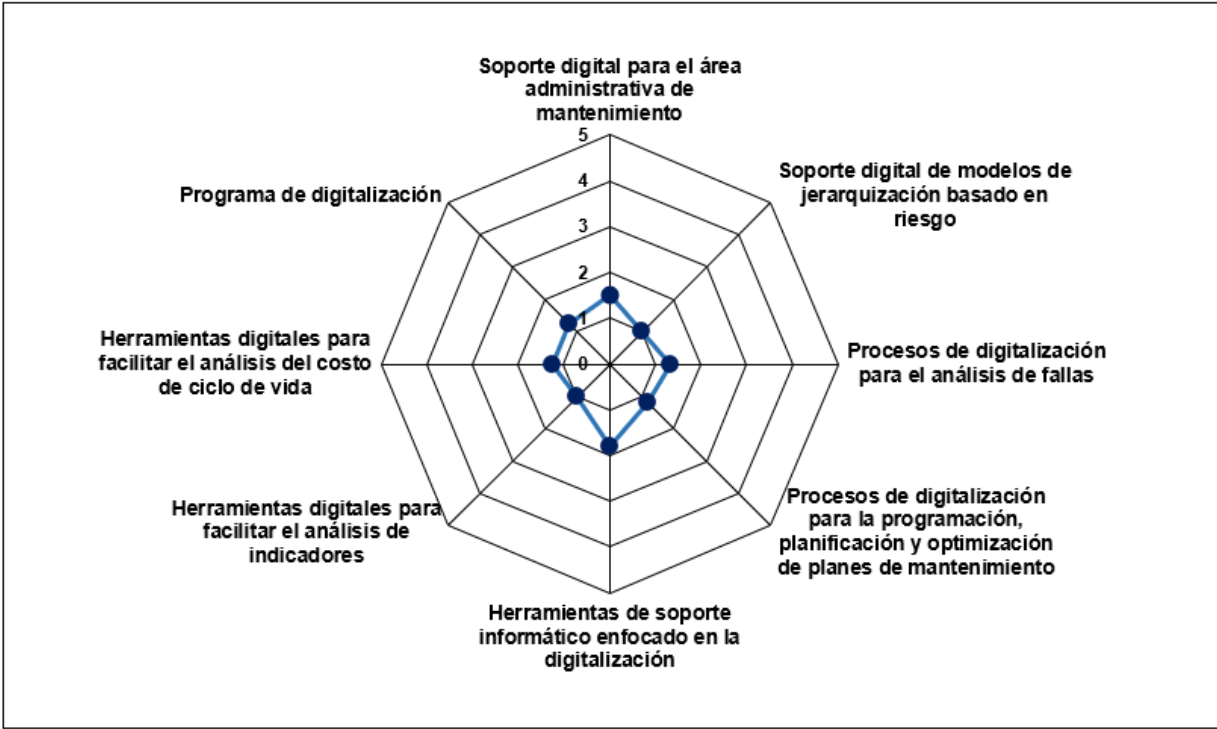


Ilustración 3-15: Gráfico tipo radial Digitalización. Fuente: Elaboración propia en base a respuestas de expertos.

Con respecto a los resultados de la evaluación digital se encontró que la empresa no tiene participación en con la industria 4.0 tales fases son la 2,3,4 en donde no abordaba en lo absoluto el sector digital, por otro lado, existen 4 fases (1,5,6,7) en donde la empresa posee participación en temas relacionados con la industria 4.0 y 1 fase (8) con buenas prácticas en el sector de la industria 4.0, fase la cual está dedicada a la implementación de nuevas tecnologías y el mejoramiento continuo.

Para concluir el análisis de los datos, se realizará una evaluación de las respuestas utilizando el modelo de Alfa de Cronbach. Esta medida estadística se emplea para evaluar la consistencia interna de un conjunto de preguntas o ítems en un cuestionario o prueba.

3.2. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS

El coeficiente de Alfa de Cronbach indica en simples palabras la dispersión que poseen las respuestas a las preguntas. Se expresa en una escala de 0 a 1, donde valores más cercanos a 1 sugieren una mayor consistencia. Se considera aceptable un alfa de 0.70 o superior.

$$\alpha = \frac{k}{k - 1} \left[ 1 - \frac{\sum V_i}{V_t} \right]$$

$\alpha$  : Alfa de Cronbach  
 $k$  : Número de ítems  
 $V_i$ : Varianza de cada ítem  
 $V_t$ : Varianza del total

Ilustración 3-16: Fórmula Alfa de Cronbach

La fórmula del Alfa de Cronbach compara la varianza total con la varianza de los ítems, proporcionando así una medida cuantitativa de la fiabilidad de la escala. No se recomienda utilizar para muestras sobre 30 ítems según: [21] Torres Leandro, Jack. (2021). Fiabilidad de las escalas: interpretación y limitaciones del Alfa de Cronbach.

| Alfa de Cronbach       | Dispersión de las preguntas      |
|------------------------|----------------------------------|
| $\alpha < 0,70$        | Alta Dispersión                  |
| $0,70 < \alpha < 0,90$ | Dispersión aceptable             |
| $0,91 < \alpha < 1,00$ | Existe Redundancia o Duplicación |

Ilustración 3-17: Niveles de confiabilidad Alfa de Cronbach. Fuente: Elaboración propia en base a [21] Torres Leandro, Jack. (2021). Fiabilidad de las escalas: interpretación y limitaciones del Alfa de Cronbach

A continuación, se presenta el análisis realizado a las preguntas de las distintas fases del MGM mediante el modelo Alfa de Cronbach.

3.2.1 Análisis de respuestas AMORMS

Tabla 3-8 Resultados Alpha de Cronbach AMORMS

| Fase 1     |                   | Fase 2     |                   | Fase 3     |                   | Fase 4     |                   |
|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| k=         | 25                | k=         | 15                | k=         | 15                | k=         | 20                |
| Vi         | 12,875            | Vi         | 8,3125            | Vi         | 14,4375           | Vi         | 7,75              |
| Vt         | 79,5              | Vt         | 54,6875           | Vt         | 80,1875           | Vt         | 53                |
| <b>α =</b> | <b>0,87296908</b> | <b>α =</b> | <b>0,90857143</b> | <b>α =</b> | <b>0,87852132</b> | <b>α =</b> | <b>0,89870904</b> |
| Fase 5     |                   | Fase 6     |                   | Fase 7     |                   | Fase 8     |                   |
| k=         | 20                | k=         | 25                | k=         | 15                | k=         | 15                |
| Vi         | 8,75              | Vi         | 8,8125            | Vi         | 5,9375            | Vi         | 8,1875            |
| Vt         | 59,25             | Vt         | 42,1875           | Vt         | 34,6875           | Vt         | 41,1875           |
| <b>α =</b> | <b>0,89717966</b> | <b>α =</b> | <b>0,82407407</b> | <b>α =</b> | <b>0,88803089</b> | <b>α =</b> | <b>0,85844353</b> |

En base a los valores obtenidos por el alfa de Cronbach con respecto a las preguntas relacionadas con la AMORMS, se puede determinar que las preguntas fueron consistentes y pertinentes al ámbito en donde se desarrolla la empresa. Además, no sugiere la existencia de altas dispersiones en las respuestas dadas por los expertos, por lo que podemos asumir que hay concordancia dentro de las herramientas de gestión de mantenimiento que poseen en la empresa.

3.2.2 Análisis de respuestas 4.0

Tabla 3-9 Resultado Alpha de Cronbach Evaluación 4.0

| Fase 1     |                   | Fase 2     |                   | Fase 3     |                   | Fase 4     |                   |
|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|
| k=         | 4                 | k=         | 4                 | k=         | 6                 | k=         | 5                 |
| Vi         | 0,6875            | Vi         | 1,9375            | Vi         | 2,9375            | Vi         | 2,4375            |
| Vt         | 1,6875            | Vt         | 5,1875            | Vt         | 11,1875           | Vt         | 8,1875            |
| <b>α =</b> | <b>0,79012346</b> | <b>α =</b> | <b>0,83534137</b> | <b>α =</b> | <b>0,8849162</b>  | <b>α =</b> | <b>0,8778626</b>  |
| Fase 5     |                   | Fase 6     |                   | Fase 7     |                   | Fase 8     |                   |
| k=         | 5                 | k=         | 6                 | k=         | 4                 | k=         | 4                 |
| Vi         | 2,875             | Vi         | 2,25              | Vi         | 0,875             | Vi         | 3,8125            |
| Vt         | 8,75              | Vt         | 8,1875            | Vt         | 2,25              | Vt         | 10,6875           |
| <b>α =</b> | <b>0,83928571</b> | <b>α =</b> | <b>0,87022901</b> | <b>α =</b> | <b>0,81481481</b> | <b>α =</b> | <b>0,85769981</b> |

En cuanto a la evaluación digital, también se encuentra dentro del rango aceptable de respuestas, al igual que la evaluación realizada a las preguntas de la AMORMS. Por lo tanto, se puede determinar que las preguntas y respuestas fueron sólidas y contundentes con respecto al área en la que se desempeña la empresa aclarando que existe concordancia en cuanto al nivel digital que se encuentran.

### **3.3 RECOMENDACIONES PARA LA EMPRESA**

A continuación, se generarán las recomendaciones que se le dará a la empresa y algunas de las posibles ventajas que podrían obtener si implementan parte de las tecnologías de la industria 4.0.

#### **3.3.1 AMORMS**

- Fase 2 - Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (Críticidad de Activos):

Para mejorar la jerarquización basada en riesgo, se sugiere tomar un enfoque destinado en la evaluación de riesgos mediante las metodologías como Análisis de Modo y Efecto de Falla o Análisis de Modo de Falla, Efecto y Críticidad. Utilizar las metodologías AMEF y FMECA para analizar modos de falla potenciales, evaluar las consecuencias y determinar la criticidad de los activos.

- Fase 3 - Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz - ACR):

Se recomienda invertir en programas de capacitación especializados en la metodología ACR. Esta formación es esencial para fortalecer las habilidades del equipo en la identificación y resolución de las causas fundamentales de los problemas. Asimismo, se sugiere establecer protocolos y procedimientos estandarizados para la recolección y análisis de datos. La definición de procesos estandarizados facilita la interpretación de datos, minimiza errores y proporciona una base sólida para abordar y evaluar problemas de manera coherente.

- Fase 4 - Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones:

Buscar fomentar la colaboración entre los departamentos que estén destinados a la planificación y programación del mantenimiento en la empresa. En conjunto con lo anterior, también establecer reuniones periódicas entre los departamentos destinadas a analizar los planes en función de necesidades de la empresa.

Además, se recomienda la implementación de un Sistema de gestión de mantenimiento asistido para planificar y programar actividades de mantenimiento de manera eficiente, facilitar la asignación de recursos y el seguimiento en tiempo real de las operaciones.

- Fase 5 - Procesos de asignación de recursos, soporte informático y soporte logístico a los procesos de Mantenimiento y Confiabilidad:

Se recomienda utilizar una plataforma de gestión de activos que posibilite un seguimiento detallado de la disponibilidad y estado de los activos. Esto con el fin de

obtener una asignación de recursos más efectiva, considerando la criticidad y las necesidades específicas de mantenimiento.

- Fase 6 - Procesos de control y análisis de indicadores técnicos del negocio (RAM):

Se recomienda la implementación de un sistema de retroalimentación continua que involucre a los equipos y a los responsables de la toma de decisiones, es decir que los stakeholders clave, como gerentes de operaciones, ingenieros de mantenimiento y personal de calidad, en el proceso de definición y revisión de KPIs. (ACOPLAR al estándar de la minera.)

- Fase 7 - Procesos de Análisis de Costos de Ciclo de Vida:

Se recomienda la implementación de un sistema integrado de gestión de activos, con el fin de rastrear y analizar eficientemente los costos asociados a cada fase del ciclo de vida del activo, estableciendo procedimientos estandarizados para la recopilación de datos.

También se recomienda emplear metodologías como la del análisis costo beneficio, con el fin de evaluar la rentabilidad de las inversiones y decisiones que se hayan tomado en el área de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida.

Además, ver la posibilidad de llegar a un acuerdo con el proveedor de maquinarias para crear un puesto de encargado de inspección de los mantenimientos ejecutados, con el fin de agregar veracidad a la tarea realizada.

- Fase 8 - Proceso de revisión y mejora continua:

Se recomienda dar capacitaciones al personal en relación con las metodologías y herramientas de mejora continua, con el fin de que se desarrolle una cultura que promueva la mejora constante dentro de la empresa.

Dentro de las reuniones periódicas, buscar fomentar una cultura de apoyo entre los departamentos con el objetivo de mejorar las relaciones, reducir los tiempos muertos y aumentar la eficacia.

### 3.3.2 Evaluación Digital

Con respecto a las recomendaciones que involucran la evaluación digital, se sugiere comenzar con la siguiente base:

1. Implementar las recomendaciones dadas para la auditoría AMORMS.
2. Iniciar con programas de capacitación enfocados en la Industria 4.0. Estos deben abordar la identificación de herramientas, plataformas y modelos relacionados con cada una de las fases propuestas en el modelo de gestión de mantenimiento 4.0.

Una opción también puede ser contratar personal especializado en el ámbito de la industria 4.0, con el fin de que ayude al proceso de implementación de nuevas tecnologías.

Una vez completados el punto 1 y 2, se sugieren las siguientes acciones específicas para abordar las fases del MGM 4.0:

- Fase 1 - Soporte Digital para el Área Administrativa de Mantenimiento:

Evaluar la implementación de las herramientas Big Data y Machine Learning con el fin de ayudar en la gestión de datos, la automatización de procesos administrativos y la optimización de recursos.

- Fase 2 - Soporte Digital de Modelos de Jerarquización Basado en Riesgo:

Investigar y evaluar la implementación de herramientas que se basen en modelos de Machine Learning o redes neuronales, con el fin de mejorar la eficacia de los modelos de jerarquización basados riesgo.

- Fase 3 - Procesos de Digitalización para el Análisis de Fallas:

Implementar las tecnologías de Gemelos Digitales dentro de la empresa, con el fin de monitorear el rendimiento de los activos en tiempo real, y compararlo con su activo físico con el fin de identificar fallas tempranas y/o anteponerse a las fallas.

- Fase 4 - Procesos de Digitalización para la Programación, Planificación y Optimización de Planes de Mantenimiento:

Aplicar modelos de Machine Learning con el fin de analizar los históricos de falla y mantenimientos, en base a ellos predecir los momentos más convenientes para realizar los mantenimientos.

- Fase 5 - Herramientas de Soporte Informático Enfocado en la Digitalización:

Crear modelos de aprendizaje automático, basado en el Machine Learning, con el fin de optimizar la asignación de recursos para el mantenimiento.

Implementar el Blockchain para garantizar acuerdos de contratos establecidos con proveedores con el fin de establecer tiempos fijos de entrega de insumos.

- Fase 6 - Herramientas Digitales para Facilitar el Análisis de Indicadores:

Se recomienda implementar sensores IoT, con el fin de mantener un monitoreo continuo del rendimiento de los activos y en conjunto con el Big Data generar una integración de datos con el fin de obtener una visión más específica de los datos y su impacto en el rendimiento general.

- Fase 7 - Herramientas Digitales para Facilitar el Análisis del Costo de Ciclo de Vida:

Evaluar la implementación de Sensores IoT, Big Data y Gemelos Digitales, con el fin de tener todos los datos asociados al activo a lo largo de su ciclo de vida, y en base a ellos simular las acciones que sean las más convenientes, como seguir generando mantenimientos tradicionales, generar overhauls o dar de baja el activo.

- Fase 8 - Programa de Digitalización:

Se recomienda la implementación de herramientas como Big Data, en conjunto con algoritmos de Machine Learning, para realizar análisis de rendimiento en las distintas fases del MGM 4.0. El objetivo es identificar posibles mejoras y puntos débiles.

El proceso de integrar metodologías estandarizadas ya sea para la resolución de problemas o la jerarquización de activos, plantea una base sólida que se puede justificar al contribuir a la reducción de tiempos muertos, la disminución de equipos devueltos por la empresa a la que presta servicios y todos los extras que conlleva, como los tiempos fuera de servicio, tiempos de operación y horas persona.

Anualmente, se rechazan en promedio 7 equipos por las empresas a las que prestan servicios debido al incumplimiento del estándar establecido por ellas. Por lo tanto, asegurándonos del cumplimiento de un proceso estandarizado de análisis de fallas, programación y planificación de mantenimiento del equipo, se estima que podemos reducir esta cifra de 7 equipos a un máximo de 2 equipos al año, dejando un margen de error humano.

A continuación, se exponen casos prácticos exitosos para tomar como ejemplo en la implementación de las tecnologías, con el fin de mejorar la empresa MPM Ltda.

3.3.3 Casos Prácticos de Éxito a Considerar

Respecto a las tecnologías de la industria 4.0, existe diversos estudios donde se aprovechan los modelos de Machine Learning para la predicción de eventos y la gestión de inventarios a continuación se presentarán fragmentos de dichas investigaciones y lo beneficios aportados a las empresas.

- Machine Learning

En un estudio piloto aplicado en la refinería ENAP, realizado por Manuel Antonio Diaz Villouta de la Universidad Católica de Valparaíso, se basó en la gestión de inventarios para el área de mantenimiento, mediante la comparación de dos métodos, “XGBoost” de aprendizaje automático y ARIMA un modelo autorregresivo integrado de promedio móvil, en donde el modelo más conveniente fue el de aprendizaje automático, destacando solo la utilización de datos de consumos y fechas, dando a entender que con mayor cantidad de datos se podría obtener una mayor exactitud en la demanda del inventario. [11] Díaz Villouta Manuel Antonio (2023)

|      | XGBoost | ARIMA |
|------|---------|-------|
| RMSE | 4,72    | 5,98  |
| MAE  | 1,92    | 2,29  |
| MAPE | 0,18    | 0,22  |

Ilustración 3-18 Comparación KPI'S XGBoost - ARIMA.  
Fuente: Extraída desde OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PLANIFICACIÓN

Por lo que, con un pequeño ajuste de parámetros como la optimización de la demanda y la optimización del nivel de servicio, dándose el apoyo mediante algoritmos de Machine Learning, se proyectó un ahorro total de 2 millones de dólares en este trabajo.

- Digital Twins

Por otro lado, un proyecto piloto basado en las tecnologías de Gemelos Digitales y IoT en la industria petrolera logró proyectar ahorros de más de 10 millones de dólares, según Thomas Jaeger, gerente senior de productos de Baker Hughes. "Estimamos que el software que desarrollamos en MATLAB reducirá los costos generales entre un 30% y un 40%, y eso se suma a los ahorros que veremos al eliminar la necesidad de camiones adicionales en el sitio" [16] (Mathworks, s.f.).

En cuanto al contexto operacional, los camiones de Baker Hughes trabajan las 24 horas del día para explorar yacimientos de petróleo y gas natural. En un solo pozo, pueden operar hasta 20 camiones simultáneamente, con bombas de desplazamiento positivo que

inyectan una mezcla de agua y arena a altas presiones en lo profundo de los pozos perforados. Estas bombas y sus componentes internos, como válvulas, asientos de válvulas, sellos y émbolos, son costosos y representan aproximadamente 100.000 dólares del costo total de 1,5 millones de dólares del camión.

Para monitorear las bombas en busca de un desgaste potencialmente catastrófico y predecir fallas antes de que ocurran, Baker Hughes analiza los datos de los sensores de la bomba con MATLAB y aplica algoritmos de aprendizaje automático de MATLAB.

El desafío al que se enfrentaron los ingenieros de Baker Hughes fue el siguiente: si un camión en un sitio activo tiene una falla en la bomba, Baker Hughes debe reemplazar el camión inmediatamente para garantizar la operación continua. Enviar camiones de repuesto a cada sitio le cuesta a la empresa decenas de millones de dólares en ingresos que esos camiones podrían generar si estuvieran en uso activo en otro sitio. La incapacidad de predecir con precisión cuándo las válvulas y bombas requerirán mantenimiento sustenta otros costos. Un mantenimiento demasiado frecuente desperdicia esfuerzo y resulta en el reemplazo de piezas aún utilizables, mientras que un mantenimiento demasiado poco frecuente corre el riesgo de dañar las bombas sin posibilidad de reparación.

Los ingenieros de Baker Hughes querían desarrollar un sistema que pudiera determinar cuándo una máquina estaba a punto de fallar y necesitaba mantenimiento. Para desarrollar este sistema, el equipo necesitaba procesar y analizar hasta un terabyte de datos recopilados a 50.000 muestras por segundo de sensores instalados en 10 camiones que operaban en el campo. A partir de este extenso conjunto de datos, necesitaban identificar los parámetros que eran útiles para predecir fallas.

En base a esto, la solución propuesta fue: utilizar MATLAB para desarrollar un software de monitoreo del estado de la bomba que utiliza análisis de datos para el mantenimiento predictivo.

Importaron datos recopilados en el campo de temperatura, presión, vibración y otros sensores a MATLAB. El equipo trabajó con un ingeniero de soporte de Mathworks para desarrollar un script personalizado para leer y analizar datos de sensores almacenados en archivos binarios en un formato propietario.

Trabajando en MATLAB, el equipo de Baker Hughes analizó los datos importados para determinar qué señales de los datos tenían la mayor influencia en el desgaste del equipo. Este paso incluyó realizar transformadas de Fourier y análisis espectral, así como filtrar grandes movimientos del camión, la bomba y el fluido para detectar mejor las vibraciones más pequeñas de las válvulas y los asientos de las válvulas.

Para automatizar el procesamiento de casi un terabyte de datos recopilados, el equipo escribió scripts de MATLAB que ejecutaron durante la noche.

Los ingenieros descubrieron que los datos capturados por los sensores de presión, vibración y sincronización eran los más relevantes para predecir fallas de las máquinas.

En colaboración con el ingeniero de soporte de Mathworks, el equipo evaluó varias técnicas de aprendizaje automático utilizando Statistics and Machine Learning Toolbox™ y Deep Learning Toolbox™. Esta evaluación inicial mostró que las redes neuronales produjeron los resultados más precisos. El grupo creó y entrenó una red neuronal para utilizar datos de sensores para predecir fallas en las bombas. Validaron este modelo utilizando datos adicionales del campo que no se utilizaron para construir el modelo.

Las pruebas de campo confirmaron la capacidad del sistema de monitoreo del estado de la bomba para predecir fallas en la bomba. [16] (Mathworks, s.f.).

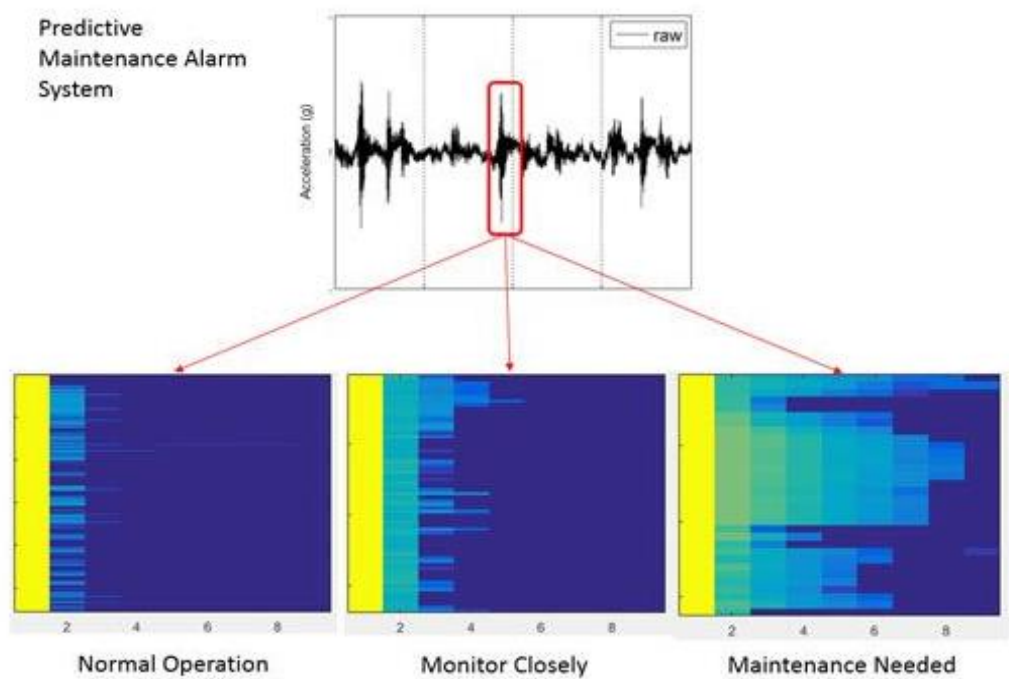


*Ilustración 3-19* Sistema de alarma de mantenimiento predictivo de Baker Hughes, basado en MATLAB. Fuente: extraído desde: [https://la.mathworks.com/company/user\\_stories/baker-hughes-develops-predictive-maintenance-software-for-gas-and-oil-extraction-equipment-using-data-analytics-and-machine-learning.html](https://la.mathworks.com/company/user_stories/baker-hughes-develops-predictive-maintenance-software-for-gas-and-oil-extraction-equipment-using-data-analytics-and-machine-learning.html)

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Para cerrar el trabajo se hace un pequeño resumen de las principales fortalezas y amenazas de la implementación de estas metodologías

Principales Fortalezas de implementar este método:

1. La implementación de esta metodología puede convertirse en una herramienta de uso continuo. Se contempla generar la evaluación cada 2 o 3 años dando la posibilidad de poder medir los impactos reales de mejora en la empresa, tanto para la gestión del mantenimiento como para la implementación de tecnologías relacionadas con él.
2. Impulso a la innovación.
3. Mejora en las prácticas de la empresa.
4. Optimización de recursos.

Principales Amenazas de implementar este método:

1. El no querer exponer a la empresa a una evaluación.
2. La falta de conocimiento sobre las nuevas tecnologías.
3. La poca credibilidad que se puede percibir de las nuevas tecnologías.
4. La falta de comunicación entre los departamentos internos de la empresa.
5. La posibilidad de no tomarse en serio la evaluación y entregar datos sin fundamentos.

Dando termino con el trabajo se plantean las conclusiones y posibles recomendaciones para tener en cuenta para mejorar el proyecto.

Dentro de lo analizado en el capítulo 1, se destaca la amplia variedad de tecnologías que han surgido en este último tiempo y sus formas de contribuir a mejorar el área de mantenimiento. No cabe duda de que seguirán emergiendo diversas tecnologías que beneficiarán aún más a las empresas. Por este motivo, es crucial dar suma importancia a la implementación de nuevas tecnologías en las empresas, independientemente del sector al que pertenezcan. Una empresa que no se adapta al cambio no perdura en el tiempo.

En el capítulo 2, se puede determinar que la propuesta desarrollada posee bases sólidas que se ajustan al objetivo principal de este proyecto. Es importante destacar las referencias consideradas para el desarrollo de la herramienta de diagnóstico, utilizando como modelos a la auditoría tradicional de mantenimiento AMORMS y al MGM. Basándose en ellos, el planteamiento del MGM 4.0 es asertivo y necesario para el desarrollo del cuestionario, generando preguntas sólidas y contundentes.

Para finalizar con los capítulos, el desarrollo del última cobra una relevancia fundamental en el proyecto, ya que materializa todo lo abordado en los capítulos previos, llevando a la práctica la teoría presentada. Los resultados obtenidos son satisfactorios, evidenciando la coherencia de las preguntas. La aplicación de la herramienta en la Sociedad de Arriendos de Equipos y Maquinarias MPM Ltda. reveló diversas oportunidades de mejora para la empresa, las cuales se han expresado como recomendaciones a considerar en el futuro. Asimismo, se ha proporcionado una explicación detallada de los beneficios que estas recomendaciones pueden aportar a la empresa.

Finalmente, se deja abierta la posibilidad de implementar varias mejoras para la primera versión de la herramienta de diagnóstico AMORMS 4.0. Entre estas mejoras se incluye el cambio o la adición de nuevas preguntas en las distintas fases, la creación de nuevas fases que involucren nuevas preguntas y la incorporación de nuevas tecnologías dentro del MGM 4.0., aplicando así el proceso de mejora continua para la herramienta de diagnóstico. Además, se da la posibilidad de implementar macros en el cuestionario existente en Excel o alternativamente, generar un cambio de plataforma con el objetivo de automatizar la creación visual de gráficos y proporcionar mensajes que destaquen las áreas con las mayores oportunidades de mejora.

## **REFERENCIAS**

1. Alabdullah Bayan, Beloff Natalia, Martin White. Rise of Big Data – Issues and Challenges. (s.a.).
2. Celina Oviedo H, Campo Arias A. Aproximación al uso del coeficiente alfade Cronbach. Revista Colombiana de Psiquiatría. (2005).
3. Crespo Márquez Adolfo, 4ª. INTEROPERABILIDAD PARA LA CALIDAD DE LAS OPERACIONES Y EL MANTENIMIENTO. (2010).
4. Crespo Márquez Adolfo, Parra Márquez Carlos. «Nota técnica 5: Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos,» de Técnicas de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicadas en el proceso de Gestión de Activos, Sevilla, España. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16765.38884> (2012).
5. Crespo Márquez Adolfo, Parra Márquez Carlos. Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada a la gestión de activos. Desarrollo y aplicación práctica de un modelo de gestión de mantenimiento (MMM). Segunda edición. Sevilla, España: INGEMAN, Escuela Superior de Ingenieros Industriales. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29363.66083> (2015).
6. Crespo Márquez Adolfo, Parra Márquez Carlos. Whitepaper #IV - Técnicas de Auditoría aplicadas en los procesos de gestión del mantenimiento de la confiabilidad (2015).
7. Crespo Márquez Adolfo, 4a. Integration of Asset Management Standard ISO55000 with a Maintenance Management Model. In: Crespo Márquez A., Komljenovic D., Amadi-Echendu J. (eds) 14th WCEAM Proceedings. WCEAM 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0_17) (2020).
8. Crespo Márquez Adolfo, 4a. V. AUDIT MODELS FOR ASSET MANAGEMENT, MAINTENANCE AND RELIABILITY PROCESSES. CASE STUDY: ELECTRICITY TRANSMISSION SECTOR. DYNA Management, 8(1). [14 p.]. DOI: <https://doi.org/10.6036/MN9826> (2020).
9. Crespo Márquez Adolfo, Parra Márquez Carlos, «Nota técnica 1: Introducción a un modelo integral de Gestión del Mantenimiento (MGM)», Editado por INGEMAN, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Sevilla, España, 2020 DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13046.63049> (2020)
10. Crespo Márquez Adolfo, Parra Márquez Carlos. Mantenimiento 4.0: Claves para la transformación digital en mantenimiento. (2022).

11. Díaz Villouta Manuel Antonio. OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PLANIFICACIÓN DE REPUESTOS MEDIANTE EL USO DE MODELOS DE MACHINE LEARNING. (2023).
12. FL Orzáeza, R. Domingo, MM Marina. Consideraciones para el Desarrollo de un Modelo de Análisis de Confiabilidad Humana (HRA) Orientado a la Seguridad en el Trabajo de Mantenimiento. (2019).
13. González-Prida V., Parra C, Gómez J.F., Crespo A. Audit to a specific study scenario according to a proposed reference framework for the improvement of the warranty management. ESREL/ESRA Rhodes (Greece). (2010).
14. GONZÁLEZ-PRIDA, V., PARRA, C., GÓMEZ, J.F., y CRESPO A. Auditoría a un escenario de estudio específico según un marco de referencia para la mejora de la gestión de la garantía. *Advances in Safety, Reliability and Risk Management - Berenguer, Grall & Guedes Soares (eds)*. DOI: <https://doi.org/10.1201/b11433>. (2012).
15. Jhon Sebastián Ramos. ¿Por qué una empresa debe migrar a nube? (2019).
16. Mathworks. Baker Hughes Develops Predictive Maintenance Software for Gas and Oil Extraction Equipment Using Data Analytics and Machine Learning. (s.a.).
17. Morales Oñate Víctor,). *Machine Learning Teoría y Práctica*. (11 de abril de 2023).
18. Organización Internacional de Normalización. Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. (ISO 14224:2016)
19. Parra Márquez Carlos. SEMINARIO MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO Y CONFIABILIDAD INTEGRADO A UN PROCESO DE GESTIÓN DE ACTIVOS (ENFOQUE INDUSTRIA 4.0). (2021).
20. Peralta Abarca, 4ª. Industria 4.0. *Inventio*. (2021).
21. Pizarro Martínez F. (2023). Gestión de la Cadena de Suministro - Introducción [7, 12, 22, 30, 47, 48, 50]. Departamento de Mecánica. Universidad Técnica Federico Santa María.
22. Torres Leandro, Jack. Fiabilidad de las escalas: interpretación y limitaciones del Alfa de Cronbach. (2021).
23. Villanueva García José David. La red neuronal. (2023).
24. Na8. Aprendizaje por refuerzo. (24 de diciembre del 2020).
25. Zhong Dong, 4ª. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology (s.a.).



## **ANEXOS**

### **ANEXO A: PREGUNTAS AUDITORÍA AMORMS**

#### **1.1 Gestión de Activos, Objetivos del Negocio (KPIs) y Organización de Soporte.**

##### **1.1 Visión Gerencial & Liderazgo.**

- 1.1.1 ¿Existen Directrices Corporativas sobre el proceso de Gestión de Activos?
- 1.1.2 ¿Existe Conciencia de la Gestión de Activos y su Administración?  
(Roles/Alcances/Responsabilidades)
- 1.1.3 ¿Existe un Control detallado sobre los objetivos del negocio desde la Gerencia Corporativa?
- 1.1.4 ¿Tiene la Gerencia Corporativa un liderazgo integral y sostenible sobre el negocio? (Control Sostenible)
- 1.1.5 ¿La Gerencia Corporativa, las gerencias intermedias y los niveles técnicos y de ejecución comparten de forma eficiente el liderazgo del negocio? (Empoderamiento)

##### **1.2 Plan Integral de Gestión de Activos.**

- 1.2.1 ¿La organización cuenta con un modelo integral de gestión de activos incluida en su visión y misión?
- 1.2.2 ¿Existe un plan integral diseñado para implantar los diversos procesos propuestos por el modelo de gestión de activos?
- 1.2.3 ¿Existe un plan de Gestión de Activos a largo plazo y está integrado con los objetivos y metas del negocio?
- 1.2.4 ¿Las técnicas de ingeniería de confiabilidad y mantenimiento están vinculadas con los procesos propuestos por el modelo de gestión de activos?
- 1.2.5 ¿Se tiene definido un proceso integral de auditoría y mejora continua del modelo de gestión de activos a ser implementado?

##### **1.3 Políticas Integrales de Mantenimiento (Gerencial).**

- 1.3.1 ¿Existe una política de mantenimiento integrada con la Gestión Corporativa del negocio?
- 1.3.2 Las políticas de mantenimiento de corto, mediano y largo plazo, ¿están ajustadas a la realidad del negocio?
- 1.3.3 ¿La política de mantenimiento ha sido creada de acuerdo con las políticas estratégicas del negocio?
- 1.3.4 ¿Las políticas de operación y mantenimiento están vinculadas e integradas con los objetivos y metas del negocio?

- 1.3.5 ¿Las políticas de Mantenimiento y Confiabilidad están integradas con la visión y misión del negocio?

#### 1.4 Estructura Organizacional.

- 1.4.1 ¿Existe de forma general una estructura organizacional bien definida?
- 1.4.2 ¿Existe una estructura organizacional eficiente para gestionar los procesos de mantenimiento y confiabilidad (están claras las responsabilidades de los grupos de confiabilidad)?
- 1.4.3 ¿Existe una estructura organizacional eficiente para gestionar las operaciones?
- 1.4.4 ¿La Organización tiene grupos específicos relacionados con la implantación de técnicas en las áreas de Confiabilidad y Mantenimiento?
- 1.4.5 ¿La Organización tiene una estructura administrativa y técnica, orientada a soportar el proceso integral de Gestión de Activos?

#### 1.5 Control Financiero (KPIS claves del negocio).

- 1.5.1 ¿Existe un procedimiento bien desarrollado para gestionar el control financiero (KPIS claves del negocio)?
- 1.5.2 ¿Los procesos de control financiero se aplican a partir del análisis de los KPIS claves de forma continua y no de forma eventual?
- 1.5.3 ¿El sistema de control financiero es monitoreado y auditado de forma eficiente?
- 1.5.4 ¿El control financiero está totalmente vinculado con las metas y objetivos de la organización?
- 1.5.5 ¿El proceso de control de los KPIS financieros están integrado con los procesos indicadores técnicos y económicos de las áreas de mantenimiento y confiabilidad?

## **2 Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (Críticidad de Activos).**

### 2.1 Gestión de Riesgos.

- 2.1.1 ¿Está definida de forma clara la política integral de gestión de Riesgos alineada con el modelo de Gestión de Activos?
- 2.1.2 ¿Existe un proceso integral de gestión para el control del riesgo en las áreas de mantenimiento y confiabilidad?
- 2.1.3 ¿Existe un proceso eficiente para comunicar los diferentes niveles de riesgos que están expuestos los integrantes de las áreas de mantenimiento y confiabilidad?
- 2.1.4 Los riesgos en los procesos de mantenimiento y confiabilidad, ¿son analizados, revisados y actualizados en forma regular?

- 2.1.5 ¿La organización utiliza modelos de gestión de riesgo como base para la toma de decisiones en las áreas de mantenimiento y confiabilidad?

## 2.2 Priorización de equipos.

- 2.2.1 ¿La organización ha desarrollado un modelo de criticidad de equipos basados en Riesgo?
- 2.2.2 ¿El modelo de Riesgo priorización de equipos esta alineado con los objetivos del negocio?
- 2.2.3 ¿La información utilizada para estimar la frecuencia y la de las fallas es tomada de una fuente confiable y veraz?
- 2.2.4 ¿El modelo de priorización de equipos es un modelo estándar para toda la organización y es utilizado en todas las áreas operacionales de la organización?
- 2.2.5 ¿Los resultados de jerarquización de equipos se utilizan para tomar decisiones de mejora en la operación y mantenimiento de los activos?

## 2.3 Gestión de los procesos de Seguridad, Salud y Ambiente.

- 2.3.1 ¿Existe un plan eficiente de emergencias y contingencias en la organización?
- 2.3.2 ¿Se ha comunicado al personal sobre las potenciales consecuencias sobre los eventos que pueden afectar seguridad, la salud y el ambiente?
- 2.3.3 ¿Se tiene desarrollada una política de emergencias y seguridad bien documentada y comunicada?
- 2.3.4 ¿Los planes de emergencias y seguridad son revisados, mejorados y actualizados de forma continua?
- 2.3.5 ¿Los planes de emergencias están certificados por organizaciones locales e internacionales reconocidas?

# 3 Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz).

## 3.1 Gestión de las fallas.

- 3.1.1 ¿Existe un procedimiento estándar para gestionar las fallas en toda la organización?
- 3.1.2 ¿El procedimiento de análisis de fallas es de fácil aplicación y es aceptado por toda la organización?
- 3.1.3 ¿Existe un proceso eficiente sobre la información recopilada en los análisis de fallas (proceso eficiente de documentación y registro)?
- 3.1.4 ¿El proceso de análisis de fallas es llevado a cabo por equipos interdisciplinarios que permitan validar con hechos reales las causas encontradas?

- 3.1.5 ¿El proceso de gestión de fallas tiene indicadores previamente definidos y analizados, que permitan medir la eficiencia y la efectividad de las recomendaciones emitidas (el proceso de análisis de fallas está incorporado a un proceso de mejoramiento continuo)?

### 3.2 Equipos multidisciplinarios de optimización.

- 3.2.1 ¿Los trabajadores están bien organizados y motivados para el logro de los objetivos del negocio?
- 3.2.2 ¿El ambiente de trabajo es propicio para realizar análisis que promuevan cambios y procesos de mejora?
- 3.2.3 ¿Existe un proceso eficiente de comunicación entre la gerencia de la organización y el resto de los niveles administrativos?
- 3.2.4 ¿La estructura organizacional de los trabajadores está orientada a soportar el proceso integral de gestión de activos?
- 3.2.5 ¿Existe un proceso estándar que promueva a los trabajadores a participar en equipos multidisciplinarios?

### 3.3 Métodos de Análisis de Fallas.

- 3.3.1 ¿La organización utiliza un método estándar de análisis de fallas para toda la organización?
- 3.3.2 ¿La metodología de Análisis de Fallas permite identificar el área de oportunidad en función de nivel de Riesgo provocado por los modos de fallas?
- 3.3.3 ¿La metodología de Análisis de Fallas propone un procedimiento que permita validar de forma eficiente las hipótesis planteadas (validación con hechos reales)?
- 3.3.4 ¿Las recomendaciones generadas de los análisis de fallas son seleccionadas a partir de un procedimiento de Análisis Costo Riesgo Beneficio?
- 3.3.5 ¿Se evalúan y auditan los resultados reales de las acciones recomendadas una vez finalizados los análisis de fallas?

## **4 Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones.**

### 4.1 Programación y planificación.

- 4.1.1 ¿Existe definida una estrategia a nivel gerencial de optimización del mantenimiento?
- 4.1.2 ¿Existe un proceso detallado y eficiente de programación y planificación del mantenimiento?

- 4.1.3 ¿Se cumplen de forma eficiente las Estrategias de Planificación y Programación para el mantenimiento de los equipos?
- 4.1.4 ¿Las estrategias de planificación y programación del mantenimiento están alineadas con el plan de negocio de la organización?
- 4.1.5 ¿Las estrategias de planificación y programación del mantenimiento se analizan y se auditan los resultados de aplicación de estas estrategias?

#### 4.2 Procedimientos e instructivos de trabajos.

- 4.2.1 ¿Existe una estructura que permita documentar los procedimientos e instructivos de trabajo?
- 4.2.2 ¿Existe un marco general de referencia y soporte para generar documentación sobre los procedimientos e instructivos de trabajo?
- 4.2.3 ¿Existe un sistema de control documental alineado con algún estándar local o internacional?
- 4.2.4 ¿Los procedimientos de trabajo son utilizados activamente por toda la fuerza de trabajo?
- 4.2.5 ¿Las mejoras a los procedimientos de trabajo son realizadas e incluidas en los planes de adiestramiento del personal?

#### 4.3 Planes de Mantenimiento por Condición (técnicas predictivas).

- 4.3.1 ¿Existe un proceso eficiente de gestión del mantenimiento por condición?
- 4.3.2 ¿Se realizan actividades de mantenimiento por condición de forma organizada y continua?
- 4.3.3 ¿Existe un plan de monitoreo de condiciones basado en el nivel de criticidad por Riesgo de los activos de la organización?
- 4.3.4 ¿El monitoreo de condiciones es parte integral de una estrategia de optimización del mantenimiento?
- 4.3.5 ¿El proceso de monitoreo de condiciones de la compañía es auditado y se le hace seguimiento a la efectividad de las recomendaciones emitidas?

#### 4.4 Técnicas de optimización en las áreas de Confiabilidad, Mantenimiento y Operaciones.

- 4.4.1 ¿La organización ha desarrollado un modelo guía de implantación de las metodologías de Confiabilidad y Mantenimiento, orientado a cumplir con los objetivos del negocio?
- 4.4.2 ¿La organización cuenta con un grupo de soporte encargado de administrar y facilitar las herramientas de Confiabilidad y Mantenimiento?

- 4.4.3 ¿Se aplican de forma organizada y constante los diferentes métodos de Confiabilidad y Mantenimiento (RCM, RCA, TPM, RBI, Lean.....)?
- 4.4.4 ¿Se miden, auditan y confirman los resultados de las aplicaciones de los métodos de Confiabilidad y Mantenimiento?
- 4.4.5 ¿Se revisan y actualizan los métodos de Confiabilidad y Mantenimiento (se toman en cuenta las novedades, actualizaciones y desarrollo de nuevos métodos de optimización)?

## **5 Procesos de asignación de recursos, soporte informático y soporte logístico a los procesos de Mantenimiento y Confiabilidad.**

### **5.1 Sistema de soporte informático de mantenimiento (software de mantenimiento).**

- 5.1.1 ¿Existe un sistema eficiente de soporte informático para el mantenimiento?
- 5.1.2 ¿El diseño de las órdenes de trabajo dentro del software es adecuado y se utiliza de forma eficiente?
- 5.1.3 ¿El sistema de órdenes de trabajo ayuda a mejorar los procesos de programación y planificación del mantenimiento?
- 5.1.4 ¿El software de mantenimiento es utilizado en forma extensa por toda la organización, incluyendo todos los tipos de paros (correctivos, preventivos, por condición, detenciones mayores, seguimiento de componentes de fallas, etc.)?
- 5.1.5 ¿El sistema de soporte informático de mantenimiento genera de forma automática indicadores técnicos y económicos, los cuáles son ampliamente usados por toda la organización para mejorar la toma de decisiones?

### **5.2 Sistema de control de documentos.**

- 5.2.1. ¿Existe un sistema general de administración de documentos técnicos de mantenimiento (planos, P&D, flujogramas de procesos, manual de operaciones, etc.)?
- 5.2.2. ¿Existe un sistema de administración de documentos que integre la información del mantenimiento con las otras áreas de la organización?
- 5.2.3. ¿Existe un sistema de administración de documentos que cumpla con alguna norma o estándar de calidad?
- 5.2.4. ¿El sistema de administración de la documentación está totalmente implementado de forma informática?
- 5.2.5. ¿El sistema de administración de documentos, está en línea para toda la organización y se usa de forma amplia y eficiente?

### **5.3 Manejo de repuestos, materiales (logística).**

- 5.3.1 ¿El proceso de general de abastecimiento y logística de repuestos es eficiente?
- 5.3.2 ¿El proceso de abastecimiento y planificación de materiales es organizado y tiene un flujo ordenado y bien controlado?
- 5.3.3 ¿El proceso de manejo y planificación de materiales está desarrollado para toda la planta?
- 5.3.4 ¿El proceso de abastecimiento y planificación de materiales está integrado de forma eficiente con el área de mantenimiento?
- 5.3.5 ¿El proceso de Abastecimiento y planificación de materiales tiene indicadores de optimización integrados a nivel de los objetivos del negocio que son evaluados, analizados, utilizados y auditados de forma continua?

5.4 Procesos de administración de la bodegas e inventarios.

- 5.4.1 ¿La administración del inventario es llevada a cabo por una organización bien estructurada para esta función?
- 5.4.2 ¿La administración del inventario es llevada y controlada por una herramienta de soporte informática?
- 5.4.3 ¿El proceso de administración de la bodega y manejo de inventarios, incluye indicadores de optimización de repuestos utilizando técnicas de análisis de Riesgo?
- 5.4.4 ¿El software de administración de los repuestos genera de forma automática, indicadores de análisis de inventarios que son utilizados para optimizar los diversos procesos de la gestión de materiales?
- 5.4.5 ¿Los procesos de administración de abastecimiento y manejo de inventarios están orientados a lograr los objetivos del proceso de Gestión de Activos?

**6 Procesos de control y análisis de indicadores técnicos del negocio (RAM).**

6.1 Indicadores de desempeño técnico.

- 6.1.1 ¿Existe un proceso de eficiente de registro de la información histórica de los equipos?
- 6.1.2 ¿Se realizan de forma eficiente análisis de mejora sobre la información histórica de fallas y operación de los equipos?
- 6.1.3 ¿Existe un programa estándar de análisis de indicadores implementado de forma eficiente?
- 6.1.4 ¿Se realizan análisis sistemáticos de fallas a partir de indicadores de riesgo previamente definidos?
- 6.1.5 ¿La organización evalúa y toma decisiones a partir de indicadores de mejora en confiabilidad y mantenibilidad de forma eficiente? (MTTF, MTTR, Disponibilidad, etc.)

## 6.2 Programas de revisión de los planes de mantenimiento.

- 6.2.1 ¿Se realizan análisis de mejora sobre los diferentes tipos de mantenimientos ejecutados?
- 6.2.2 ¿Se toman acciones sobre los análisis realizados a los diferentes tipos de mantenimientos ejecutados?
- 6.2.3 ¿El análisis de los mantenimientos ejecutados, es realizado de forma eficiente y sistemática?
- 6.2.4 ¿Las recomendaciones realizadas a partir del análisis de los mantenimientos ejecutados, son tomadas en cuenta y se auditan los resultados de las acciones emitidas?
- 6.2.5 ¿Se realiza algún proceso de benchmarking en relación con los indicadores de mantenimiento y confiabilidad?

## 6.3 Procesos de control de las operaciones.

- 6.3.1 ¿Existe un procedimiento dónde se detallen los procesos operacionales?
- 6.3.2 ¿Se relacionan los procesos operacionales con todas actividades de producción?
- 6.3.3 ¿Se relaciona las estrategias operacionales con las estrategias del mantenimiento?
- 6.3.4 ¿Están vinculadas de forma eficiente las metas operacionales con la planificación de las actividades de mantenimiento?
- 6.3.5 ¿Están integradas las estrategias de operación y producción con los procesos de programación y planificación del mantenimiento?

## 6.4 Control de contratistas.

- 6.4.1 ¿El uso de contratistas es eficiente y se tienen modelos de contratos establecidos por áreas y tipos de trabajo?
- 6.4.2 ¿Los contratos de corto y largo plazo están totalmente estandarizados?
- 6.4.3 ¿Existe un proceso de validación y auditoría de las credenciales de las contratistas que participan en los diferentes procesos de mantenimiento y operación?
- 6.4.4 ¿Existen un proceso eficiente de evaluación del desempeño real de los contratistas, que sea constantemente monitoreado y que permita tomar acciones sobre las desviaciones encontradas?
- 6.4.5 ¿Los contratos de negocios establecidos con los contratistas están totalmente alineados en términos de estrategias con los objetivos y metas del negocio?

## 6.5 Gestión de talleres.

- 6.5.1 ¿La organización cuenta con un servicio eficiente: propio o contratado de talleres para actividades de mantenimiento?
- 6.5.2 ¿Existe un proceso interno que permita evaluar el desempeño de los servicios prestados por los talleres?
- 6.5.3 ¿Existe un modelo de contrato estándar desarrollado para todos los servicios solicitados a los talleres?
- 6.5.4 ¿Existe un procedimiento específico que permita evaluar los tiempos de entrega, los costos y la calidad de ejecución de los servicios ofrecidos por los talleres?
- 6.5.5 ¿Existe un modelo de auditoría y benchmarking certificado bajo una norma local o internacional, que permita evaluar los Servicios ofrecidos por los talleres?

## **7 Procesos de Análisis de Costos de Ciclo de Vida.**

### **7.1 Asset Life Cycle Cost Management.**

- 7.1.1 ¿Existe un procedimiento eficiente de análisis del ciclo de vida de los activos?
- 7.1.2 ¿Se analiza y se pronostica el ciclo de vida de los activos de la organización?
- 7.1.3 ¿Existe un proceso de evaluación del impacto económico de la Confiabilidad en el ciclo de vida de los activos (Modelos Woodward, Williams and Scott..., etc.)?
- 7.1.4 ¿El proceso de Análisis de Ciclo de vida de los activos es llevado a cabo por equipo multidisciplinario de toda la organización en dónde participan los grupos de operaciones y mantenimiento?
- 7.1.5 ¿Se documenta de forma eficiente la información del ciclo de vida de los activos y se auditan los resultados de Ciclo de Vida de los equipos seleccionados?

### **7.2 Manejo de información en el Ciclo de Vida del Activo.**

- 7.2.1 ¿La administración de la organización revisa regularmente los factores claves de su sistema de gestión de activos (incluyendo política de gestión de activos, estrategia, objetivos, y planes) para asegurar su eficacia, adecuación y conveniencia a lo largo de todo el Ciclo de Vida?
- 7.2.2 ¿La información económica y técnica (factores claves de la gestión de activos) es considerada para la revisión, seguimiento y sustitución de los equipos?

- 7.2.3 ¿La organización usa la información económica y técnica para mejorar continuamente su sistema de gestión de activos global a lo largo de todo el Ciclo de Vida?
- 7.2.4 ¿La organización asegura que los resultados de las revisiones realizadas a los factores claves de la gestión de activos, esté disponible, para que la alta dirección tome en cuenta los resultados obtenidos, durante el análisis y la revisión de los planes estratégicos de la organización a lo largo de todo el Ciclo de Vida?
- 7.2.5 ¿La organización mantiene los registros de las revisiones de los factores claves de la gestión de activos y comunica información relevante a los empleados, proveedores de servicios contratados u otras áreas relacionadas (interesadas - stakeholders) con el proceso de gestión de activos a lo largo de todo el Ciclo de Vida?

### 7.3 Mantenimientos especiales (paradas de plantas, overhauls...).

- 7.3.1 ¿Las detenciones mayores son implementadas en forma ordenada bajo un modelo de gestión de grandes paradas de plantas?
- 7.3.2 ¿Las detenciones mayores son implementadas por grupos a dedicación exclusiva?
- 7.3.3 ¿Las detenciones mayores son programadas, planificadas y ejecutadas bajo el uso de herramientas de optimización de confiabilidad y riesgo?
- 7.3.4 ¿Existe un proceso de registro de las detenciones mayores que permita recopilar las lecciones aprendidas y todas las actividades son especificadas y estandarizadas?
- 7.3.5 ¿Existe una estrategia de integral de optimización de los procesos paradas de plantas, se auditan y se realizan análisis de benchmarking y de mejora continua?

## 8 Proceso de revisión y mejora continua.

### 8.1 Control de Calidad.

- 8.1.1 ¿Existe un modelo eficiente de gestión de la calidad dentro del área de mantenimiento?
- 8.1.2 ¿Existe el conocimiento de que la calidad contribuye a la mejora del desempeño de los procesos de mantenimiento y confiabilidad?
- 8.1.3 ¿La organización del mantenimiento está alineada con los programas de mejoramiento de la calidad?
- 8.1.4 ¿La organización de mantenimiento ha sido acreditada en alguna norma relacionada con la calidad?

8.1.5 ¿La compañía está acreditada en alguna norma de la calidad y se ha incorporado el proceso de gestión de la calidad dentro del mantenimiento?

## 8.2 Programas de mejora continua.

8.2.1 ¿Las mejoras en los procesos de mantenimiento y confiabilidad son llevadas de forma ordenada y actualizadas bajo un modelo específico?

8.2.2 ¿Existe un marco de referencia para incluir mejoras en los procesos de mantenimiento y confiabilidad?

8.2.3 ¿Existe un programa de seguimiento a las propuestas de mejoras en las áreas de mantenimiento y confiabilidad?

8.2.4 ¿El proceso de Mejora continua es una práctica común en las áreas de mantenimiento y confiabilidad?

8.2.5 ¿El proceso de mejora continua es una práctica estándar de todos los negocios que conforman el proceso industrial analizado?

## 8.3 Programas de desarrollo de personal.

8.3.1 ¿La organización cuenta con un departamento que se encargue del proceso de adiestramiento formal al personal de toda la organización?

8.3.2 ¿Se provee de adiestramiento eficiente al personal nuevo de la organización?

8.3.3 ¿Existe un plan de entrenamiento específico y ajustado a todo el ciclo de vida del trabajador?

8.3.4 ¿El programa de adiestramiento de todo el personal está adecuado al puesto de trabajo y está orientado a lograr los objetivos del negocio?

8.3.5 ¿El programa de entrenamiento incluye formación en las áreas de técnicas modernas de mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos?

*Referencia base [6] Whitepaper # IV - Técnicas de Auditoría aplicadas en los procesos de gestión del mantenimiento de la confiabilidad, (Carlos Parra Márquez & Adolfo Crespo Márquez).*

## **ANEXO B: CUESTIONARIO COMPLETO AMORMS 4.0**

### **1. Gestión de Activos, Objetivos del Negocio (KPIs) y Organización de Soporte.**

#### **1.1 Visión Gerencial & Liderazgo.**

1.1.1 ¿Existen Directrices Corporativas sobre el proceso de Gestión de Activos?

1.1.2 ¿Existe Conciencia de la Gestión de Activos y su Administración?  
(Roles/Alcances/Responsabilidades)

1.1.3 ¿Existe un Control detallado sobre los objetivos del negocio desde la Gerencia Corporativa?

- 1.1.4 ¿Tiene la Gerencia Corporativa un liderazgo integral y sostenible sobre el negocio? (Control Sostenible)
- 1.1.5 ¿La Gerencia Corporativa, las gerencias intermedias y los niveles técnicos y de ejecución comparten de forma eficiente el liderazgo del negocio? (Empoderamiento)
- 1.2 Plan Integral de Gestión de Activos.
  - 1.2.1 ¿La organización cuenta con un modelo integral de gestión de activos incluida en su visión y misión?
  - 1.2.2 ¿Existe un plan integral diseñado para implantar los diversos procesos propuestos por el modelo de gestión de activos?
  - 1.2.3 ¿Existe un plan de Gestión de Activos a largo plazo y está integrado con los objetivos y metas del negocio?
  - 1.2.4 ¿Las técnicas de ingeniería de confiabilidad y mantenimiento están vinculadas con los procesos propuestos por el modelo de gestión de activos?
  - 1.2.5 ¿Se tiene definido un proceso integral de auditoría y mejora continua del modelo de gestión de activos a ser implementado?
- 1.3 Políticas Integrales de Mantenimiento (Gerencial).
  - 1.3.1 ¿Existe una política de mantenimiento integrada con la Gestión Corporativa del negocio?
  - 1.3.2 Las políticas de mantenimiento de corto, mediano y largo plazo, ¿están ajustadas a la realidad del negocio?
  - 1.3.3 ¿La política de mantenimiento ha sido creada de acuerdo con las políticas estratégicas del negocio?
  - 1.3.4 ¿Las políticas de operación y mantenimiento están vinculadas e integradas con los objetivos y metas del negocio?
  - 1.3.5 ¿Las políticas de Mantenimiento y Confiabilidad están integradas con la visión y misión del negocio?
- 1.4 Estructura Organizacional.
  - 1.4.1 ¿Existe de forma general una estructura organizacional bien definida?
  - 1.4.2 ¿Existe una estructura organizacional eficiente para gestionar los procesos de mantenimiento y confiabilidad (están claras las responsabilidades de los grupos de confiabilidad)?
  - 1.4.3 ¿Existe una estructura organizacional eficiente para gestionar las operaciones?
  - 1.4.4 ¿La Organización tiene grupos específicos relacionados con la implantación de técnicas en las áreas de Confiabilidad y Mantenimiento?

- 1.4.5 ¿La Organización tiene una estructura administrativa y técnica, orientada a soportar el proceso integral de Gestión de Activos?

#### 1.5 Control Financiero (KPIS claves del negocio).

- 1.5.1 ¿Existe un procedimiento bien desarrollado para gestionar el control financiero (KPIS claves del negocio)?
- 1.5.2 ¿Los procesos de control financiero se aplican a partir del análisis de los KPIS claves de forma continua y no de forma eventual?
- 1.5.3 ¿El sistema de control financiero es monitoreado y auditado de forma eficiente?
- 1.5.4 ¿El control financiero está totalmente vinculado con las metas y objetivos de la organización?
- 1.5.5 ¿El proceso de control de los KPIS financieros están integrado con los procesos indicadores técnicos y económicos de las áreas de mantenimiento y confiabilidad?

#### 1.6 Soporte digital para el área administrativa de mantenimiento.

- 1.6.1 ¿La empresa tiene una estrategia de transformación digital clara en el área de mantenimiento?
- 1.6.2 ¿La empresa utiliza análisis de datos avanzados para tomar decisiones estratégicas en la gestión de activos?
- 1.6.3 ¿La empresa cuenta con una plataforma de análisis de datos integrado a un sistema de mantenimiento preventivo?
- 1.6.4 ¿Existe una plataforma de colaboración digital que permita a los equipos compartir información y conocimientos para la planificación estratégica?

### 2. Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (Criticidad de Activos).

#### 2.1 Gestión de Riesgos.

- 2.1.1 ¿Está definida de forma clara la política integral de gestión de Riesgos alineada con el modelo de Gestión de Activos?
- 2.1.2 ¿Existe un proceso integral de gestión para el control del riesgo en las áreas de mantenimiento y confiabilidad?
- 2.1.3 ¿Existe un proceso eficiente para comunicar los diferentes niveles de riesgos que están expuestos los integrantes de las áreas de mantenimiento y confiabilidad?
- 2.1.4 Los riesgos en los procesos de mantenimiento y confiabilidad, ¿son analizados, revisados y actualizados en forma regular?
- 2.1.5 ¿La organización utiliza modelos de gestión de riesgo como base para la toma de decisiones en las áreas de mantenimiento y confiabilidad?

## 2.2 Priorización de equipos.

- 2.2.1 ¿La organización ha desarrollado un modelo de criticidad de equipos basados en Riesgo?
- 2.2.2 ¿El modelo de Riesgo priorización de equipos esta alineado con los objetivos del negocio?
- 2.2.3 ¿La información utilizada para estimar la frecuencia y la de las fallas es tomada de una fuente confiable y veraz?
- 2.2.4 ¿El modelo de priorización de equipos es un modelo estándar para toda la organización y es utilizado en todas las áreas operacionales de la organización?
- 2.2.5 ¿Los resultados de jerarquización de equipos se utilizan para tomar decisiones de mejora en la operación y mantenimiento de los activos?

## 2.3 Gestión de los procesos de Seguridad, Salud y Ambiente.

- 2.3.1 ¿Existe un plan eficiente de emergencias y contingencias en la organización?
- 2.3.2 ¿Se ha comunicado al personal sobre las potenciales consecuencias sobre los eventos que pueden afectar seguridad, la salud y el ambiente?
- 2.3.3 ¿Se tiene desarrollada una política de emergencias y seguridad bien documentada y comunicada?
- 2.3.4 ¿Los planes de emergencias y seguridad son revisados, mejorados y actualizados de forma continua?
- 2.3.5 ¿Los planes de emergencias están certificados por organizaciones locales e internacionales reconocidas?

## 2.4 Soporte digital de modelos de jerarquización basado en riesgo.

- 2.4.1 ¿Se emplean algoritmos de Machine Learning para analizar patrones y tendencias en datos relacionados con las frecuencias y consecuencias de fallas de los activos de la planta?
- 2.4.2 ¿Se integran datos de diferentes activos para generar una visión integral de la jerarquización de activos?
- 2.4.3 ¿Los modelos digitales permiten evaluar el estado de los activos y su impacto en tiempo real en caso de posibles fallas?
- 2.4.4 ¿La empresa utiliza sensores IoT en los activos para recopilar datos en tiempo real sobre su rendimiento y condiciones operativas?

## 3. Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz).

### 3.1 Gestión de las fallas.

- 3.1.1 ¿Existe un procedimiento estándar para gestionar las fallas en toda la organización?

- 3.1.2 ¿El procedimiento de análisis de fallas es de fácil aplicación y es aceptado por toda la organización?
- 3.1.3 ¿Existe un proceso eficiente sobre la información recopilada en los análisis de fallas (proceso eficiente de documentación y registro)?
- 3.1.4 ¿El proceso de análisis de fallas es llevado a cabo por equipos interdisciplinarios que permitan validar con hechos reales las causas encontradas?
- 3.1.5 ¿El proceso de gestión de fallas tiene indicadores previamente definidos y analizados, que permitan medir la eficiencia y la efectividad de las recomendaciones emitidas (el proceso de análisis de fallas está incorporado a un proceso de mejoramiento continuo)?
- 3.2 Equipos multidisciplinarios de optimización.
  - 3.2.1 ¿Los trabajadores están bien organizados y motivados para el logro de los objetivos del negocio?
  - 3.2.2 ¿El ambiente de trabajo es propicio para realizar análisis que promuevan cambios y procesos de mejora?
  - 3.2.3 ¿Existe un proceso eficiente de comunicación entre la gerencia de la organización y el resto de los niveles administrativos?
  - 3.2.4 ¿La estructura organizacional de los trabajadores está orientada a soportar el proceso integral de gestión de activos?
  - 3.2.5 ¿Existe un proceso estándar que promueva a los trabajadores a participar en equipos multidisciplinarios?
- 3.3 Métodos de Análisis de Fallas.
  - 3.3.1 ¿La organización utiliza un método estándar de análisis de fallas para toda la organización?
  - 3.3.2 ¿La metodología de Análisis de Fallas permite identificar el área de oportunidad en función de nivel de Riesgo provocado por los modos de fallas?
  - 3.3.3 ¿La metodología de Análisis de Fallas propone un procedimiento que permita validar de forma eficiente las hipótesis planteadas (validación con hechos reales)?
  - 3.3.4 ¿Las recomendaciones generadas de los análisis de fallas son seleccionadas a partir de un procedimiento de Análisis Costo Riesgo Beneficio?
  - 3.3.5 ¿Se evalúan y auditan los resultados reales de las acciones recomendadas una vez finalizados los análisis de fallas?

### **3.4 Procesos de digitalización para el análisis de fallas.**

- 3.4.1 ¿La empresa recopila y almacena grandes volúmenes de datos, incluidos datos de fallas, de los equipos y activos a través de sensores y sistemas de monitoreo?
  - 3.4.2 ¿Se utilizan herramientas de visualización de datos de fallas para presentar los resultados del análisis de Big Data de manera comprensible para los equipos de mantenimiento?
  - 3.4.3 ¿La empresa utiliza algoritmos de Machine Learning para analizar datos recopilados mediante Big Data y pronosticar patrones que puedan indicar posibles modos de fallos en los equipos?
  - 3.4.4 ¿La empresa utiliza redes neuronales como parte de sus algoritmos de Machine Learning para analizar patrones de fallas en los equipos?
  - 3.4.5 ¿La empresa emplea herramientas como gemelos digitales o realidad aumentada en los procesos de validación de hipótesis?
  - 3.4.6 ¿La empresa implementa técnicas para llevar a cabo la evaluación y seguimiento del impacto de sus operaciones o proyectos?
- 4. Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones.**
- 4.1 Programación y planificación.
- 4.1.1 ¿Existe definida una estrategia a nivel gerencial de optimización del mantenimiento?
  - 4.1.2 ¿Existe un proceso detallado y eficiente de programación y planificación del mantenimiento?
  - 4.1.3 ¿Se cumplen de forma eficiente las Estrategias de Planificación y Programación para el mantenimiento de los equipos?
  - 4.1.4 ¿Las estrategias de planificación y programación del mantenimiento están alineadas con el plan de negocio de la organización?
  - 4.1.5 ¿Las estrategias de planificación y programación del mantenimiento se analizan y se auditan los resultados de aplicación de estas estrategias?
- 4.2 Procedimientos e instructivos de trabajos.
- 4.2.1 ¿Existe una estructura que permita documentar los procedimientos e instructivos de trabajo?
  - 4.2.2 ¿Existe un marco general de referencia y soporte para generar documentación sobre los procedimientos e instructivos de trabajo?
  - 4.2.3 ¿Existe un sistema de control documental alineado con algún estándar local o internacional?
  - 4.2.4 ¿Los procedimientos de trabajo son utilizados activamente por toda la fuerza de trabajo?

- 4.2.5 ¿Las mejoras a los procedimientos de trabajo son realizadas e incluidas en los planes de adiestramiento del personal?

#### 4.3 Planes de Mantenimiento por Condición (técnicas predictivas).

- 4.3.1 ¿Existe un proceso eficiente de gestión del mantenimiento por condición?
- 4.3.2 ¿Se realizan actividades de mantenimiento por condición de forma organizada y continua?
- 4.3.3 ¿Existe un plan de monitoreo de condiciones basado en el nivel de criticidad por Riesgo de los activos de la organización?
- 4.3.4 ¿El monitoreo de condiciones es parte integral de una estrategia de optimización del mantenimiento?
- 4.3.5 ¿El proceso de monitoreo de condiciones de la compañía es auditado y se le hace seguimiento a la efectividad de las recomendaciones emitidas?

#### 4.4 Técnicas de optimización en las áreas de Confiabilidad, Mantenimiento y Operaciones.

- 4.4.1 ¿La organización ha desarrollado un modelo guía de implantación de las metodologías de Confiabilidad y Mantenimiento, orientado a cumplir con los objetivos del negocio?
- 4.4.2 ¿La organización cuenta con un grupo de soporte encargado de administrar y facilitar las herramientas de Confiabilidad y Mantenimiento?
- 4.4.3 ¿Se aplican de forma organizada y constante los diferentes métodos de Confiabilidad y Mantenimiento (RCM, RCA, TPM, RBI, Lean.....)?
- 4.4.4 ¿Se miden, auditan y confirman los resultados de las aplicaciones de los métodos de Confiabilidad y Mantenimiento?
- 4.4.5 ¿Se revisan y actualizan los métodos de Confiabilidad y Mantenimiento (se toman en cuenta las novedades, actualizaciones y desarrollo de nuevos métodos de optimización)?

#### **4.5 Procesos de digitalización para la programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento.**

- 4.5.1 ¿La empresa cuenta con una plataforma de análisis de datos escalable y de fácil integración para procesos de planificación y programación en los sistemas existentes en el área de mantenimiento?**
- 4.5.2 ¿La plataforma de Cloud utilizada permite la captura, procesamiento y análisis de información relacionada con el análisis de modo y efecto de falla (AMEF), además de facilitar el acceso remoto a los modelos de Digital Twins para su análisis y simulación desde diferentes ubicaciones, y la optimización de estrategias de mantenimiento?**

- 4.5.3 ¿Se utilizan herramientas digitales para optimizar la estrategia de mantenimiento y los tiempos de inactividad?
- 4.5.4 ¿La empresa utiliza plataformas de Big Data para recopilar, almacenar y procesar datos relevantes de producción, operación y mantenimiento?
- 4.5.5 ¿La empresa posee una herramienta que permita simular las consecuencias (Seguridad, ambiente, producción y costos) de los diferentes modos de fallos?

**5. Procesos de asignación de recursos, soporte informático y soporte logístico a los procesos de Mantenimiento y Confiabilidad.**

5.1 Sistema de soporte informático de mantenimiento (software de mantenimiento).

- 5.1.1 ¿Existe un sistema eficiente de soporte informático para el mantenimiento?
- 5.1.2 ¿El diseño de las órdenes de trabajo dentro del software es adecuado y se utiliza de forma eficiente?
- 5.1.3 ¿El sistema de órdenes de trabajo ayuda a mejorar los procesos de programación y planificación del mantenimiento?
- 5.1.4 ¿El software de mantenimiento es utilizado en forma extensa por toda la organización, incluyendo todos los tipos de paros (correctivos, preventivos, por condición, detenciones mayores, seguimiento de componentes de fallas, etc.)?
- 5.1.5 ¿El sistema de soporte informático de mantenimiento genera de forma automática indicadores técnicos y económicos, los cuáles son ampliamente usados por toda la organización para mejorar la toma de decisiones?

5.2 Sistema de control de documentos.

- 5.2.1 ¿Existe un sistema general de administración de documentos técnicos de mantenimiento (planos, P&D, flujogramas de procesos, manual de operaciones, etc.)?
- 5.2.2 ¿Existe un sistema de administración de documentos que integre la información del mantenimiento con las otras áreas de la organización?
- 5.2.3 ¿Existe un sistema de administración de documentos que cumpla con alguna norma o estándar de calidad?
- 5.2.4 ¿El sistema de administración de la documentación está totalmente implementado de forma informática?
- 5.2.5 ¿El sistema de administración de documentos, está en línea para toda la organización y se usa de forma amplia y eficiente?

5.3 Manejo de repuestos, materiales (logística).

- 5.3.1 ¿El proceso de general de abastecimiento y logística de repuestos es eficiente?
  - 5.3.2 ¿El proceso de abastecimiento y planificación de materiales es organizado y tiene un flujo ordenado y bien controlado?
  - 5.3.3 ¿El proceso de manejo y planificación de materiales está desarrollado para toda la planta?
  - 5.3.4 ¿El proceso de abastecimiento y planificación de materiales está integrado de forma eficiente con el área de mantenimiento?
  - 5.3.5 ¿El proceso de Abastecimiento y planificación de materiales tiene indicadores de optimización integrados a nivel de los objetivos del negocio que son evaluados, analizados, utilizados y auditados de forma continua?
- 5.4 Procesos de administración de la bodegas e inventarios.
- 5.4.1 ¿La administración del inventario es llevada a cabo por una organización bien estructurada para esta función?
  - 5.4.2 ¿La administración del inventario es llevada y controlada por una herramienta de soporte informática?
  - 5.4.3 ¿El proceso de administración de la bodega y manejo de inventarios, incluye indicadores de optimización de repuestos utilizando técnicas de análisis de Riesgo?
  - 5.4.4 ¿El software de administración de los repuestos genera de forma automática, indicadores de análisis de inventarios que son utilizados para optimizar los diversos procesos de la gestión de materiales?
  - 5.4.5 ¿Los procesos de administración de abastecimiento y manejo de inventarios están orientados a lograr los objetivos del proceso de Gestión de Activos?

#### **5.5 Herramientas de soporte informático enfocado en la digitalización.**

- 5.5.1 ¿La empresa tiene en marcha proyectos piloto que aprovechan Machine Learning para mejorar la eficiencia de las operaciones?**
- 5.5.2 ¿Se utilizan algoritmos de Machine Learning para analizar los datos relacionados a los costos de las estrategias de mantenimiento que ayuden a optimizar los presupuestos de mantenimiento?**
- 5.5.3 ¿La empresa integra los Smart Contract en función de la demanda del inventario, vinculando costos beneficios?**
- 5.5.4 ¿La empresa utiliza herramientas para optimizar los procesos logísticos relacionados con los repuestos, en sus planes de mantenimiento?**

**5.5.5 ¿La empresa posee una herramienta que permita vincular las frecuencias de mantenimiento con los repuestos? (ejemplo: IBM máximo, SAP PM, eMaint)**

**6. Procesos de control y análisis de indicadores técnicos del negocio (RAM).**

**6.1 Indicadores de desempeño técnico.**

- 6.1.1 ¿Existe un proceso de eficiente de registro de la información histórica de los equipos?
- 6.1.2 ¿Se realizan de forma eficiente análisis de mejora sobre la información histórica de fallas y operación de los equipos?
- 6.1.3 ¿Existe un programa estándar de análisis de indicadores implementado de forma eficiente?
- 6.1.4 ¿Se realizan análisis sistemáticos de fallas a partir de indicadores de riesgo previamente definidos?
- 6.1.5 ¿La organización evalúa y toma decisiones a partir de indicadores de mejora en confiabilidad y mantenibilidad de forma eficiente? (MTTF, MTTR, Disponibilidad, etc.)

**6.2 Programas de revisión de los planes de mantenimiento.**

- 6.2.1 ¿Se realizan análisis de mejora sobre los diferentes tipos de mantenimientos ejecutados?
- 6.2.2 ¿Se toman acciones sobre los análisis realizados a los diferentes tipos de mantenimientos ejecutados?
- 6.2.3 ¿El análisis de los mantenimientos ejecutados, es realizado de forma eficiente y sistemática?
- 6.2.4 ¿Las recomendaciones realizadas a partir del análisis de los mantenimientos ejecutados, son tomadas en cuenta y se auditan los resultados de las acciones emitidas?
- 6.2.5 ¿Se realiza algún proceso de benchmarking en relación con los indicadores de mantenimiento y confiabilidad?

**6.3 Procesos de control de las operaciones.**

- 6.3.1 ¿Existe un procedimiento dónde se detallen los procesos operacionales?
- 6.3.2 ¿Se relacionan los procesos operacionales con todas actividades de producción?
- 6.3.3 ¿Se relaciona las estrategias operacionales con las estrategias del mantenimiento?
- 6.3.4 ¿Están vinculadas de forma eficiente las metas operacionales con la planificación de las actividades de mantenimiento?

- 6.3.5 ¿Están integradas las estrategias de operación y producción con los procesos de programación y planificación del mantenimiento?

#### 6.4 Control de contratistas.

- 6.4.1 ¿El uso de contratistas es eficiente y se tienen modelos de contratos establecidos por áreas y tipos de trabajo?
- 6.4.2 ¿Los contratos de corto y largo plazo están totalmente estandarizados?
- 6.4.3 ¿Existe un proceso de validación y auditoría de las credenciales de las contratistas que participan en los diferentes procesos de mantenimiento y operación?
- 6.4.4 ¿Existen un proceso eficiente de evaluación del desempeño real de los contratistas, que sea constantemente monitoreado y que permita tomar acciones sobre las desviaciones encontradas?
- 6.4.5 ¿Los contratos de negocios establecidos con los contratistas están totalmente alineados en términos de estrategias con los objetivos y metas del negocio?

#### 6.5 Gestión de talleres.

- 6.5.1 ¿La organización cuenta con un servicio eficiente: propio o contratado de talleres para actividades de mantenimiento?
- 6.5.2 ¿Existe un proceso interno que permita evaluar el desempeño de los servicios prestados por los talleres?
- 6.5.3 ¿Existe un modelo de contrato estándar desarrollado para todos los servicios solicitados a los talleres?
- 6.5.4 ¿Existe un procedimiento específico que permita evaluar los tiempos de entrega, los costos y la calidad de ejecución de los servicios ofrecidos por los talleres?
- 6.5.5 ¿Existe un modelo de auditoría y benchmarking certificado bajo una norma local o internacional, que permita evaluar los Servicios ofrecidos por los talleres?

#### 6.6 Herramientas digitales para facilitar el análisis de indicadores.

- 6.6.1 ¿La empresa recopila y almacena datos detallados sobre cambios y eventos en los procesos técnicos, de manera automatizada, como los tiempos medios para falla (MTTF), los tiempos medios para reparación (MTTR) y las tasas de falla (FF)?
- 6.6.2 ¿Se utilizan herramientas de análisis de Big Data para procesar y analizar esta información con el objetivo de evaluar el desempeño de los indicadores de mantenimiento?

- 6.6.3 ¿La empresa utiliza herramientas para predecir comportamientos y ajustar de forma automática la frecuencia de ejecución de mantenimiento basadas en tiempo por condición?
- 6.6.4 ¿La empresa posee herramientas que permitan integrar el análisis de indicadores técnicos con los indicadores asociados a costos del mantenimiento?
- 6.6.5 ¿La empresa posee una plataforma digital que permita crear una base de datos totalmente automatizada? Ejemplo: Generar un benchmarking de los activos operando en planta (asociando indicadores técnicos y de costos de mantenimiento)

## 7. Procesos de Análisis de Costos de Ciclo de Vida.

### 7.1 Asset Life Cycle Cost Management.

- 7.1.1 ¿Existe un procedimiento eficiente de análisis del ciclo de vida de los activos?
- 7.1.2 ¿Se analiza y se pronostica el ciclo de vida de los activos de la organización?
- 7.1.3 ¿Existe un proceso de evaluación del impacto económico de la Confiabilidad en el ciclo de vida de los activos (Modelos Woodward, Williams and Scott..., etc.)?
- 7.1.4 ¿El proceso de Análisis de Ciclo de vida de los activos es llevado a cabo por equipo multidisciplinario de toda la organización en dónde participan los grupos de operaciones y mantenimiento?
- 7.1.5 ¿Se documenta de forma eficiente la información del ciclo de vida de los activos y se auditan los resultados de Ciclo de Vida de los equipos seleccionados?

### 7.2 Manejo de información en el Ciclo de Vida del Activo.

- 7.2.1 ¿La administración de la organización revisa regularmente los factores claves de su sistema de gestión de activos (incluyendo política de gestión de activos, estrategia, objetivos, y planes) para asegurar su eficacia, adecuación y conveniencia a lo largo de todo el Ciclo de Vida?
- 7.2.2 ¿La información económica y técnica (factores claves de la gestión de activos) es considerada para la revisión, seguimiento y sustitución de los equipos?
- 7.2.3 ¿La organización usa la información económica y técnica para mejorar continuamente su sistema de gestión de activos global a lo largo de todo el Ciclo de Vida?

- 7.2.4 ¿La organización asegura que los resultados de las revisiones realizadas a los factores claves de la gestión de activos, esté disponible, para que la alta dirección tome en cuenta los resultados obtenidos, durante el análisis y la revisión de los planes estratégicos de la organización a lo largo de todo el Ciclo de Vida?
- 7.2.5 ¿La organización mantiene los registros de las revisiones de los factores claves de la gestión de activos y comunica información relevante a los empleados, proveedores de servicios contratados u otras áreas relacionadas (interesadas - stakeholders) con el proceso de gestión de activos a lo largo de todo el Ciclo de Vida?

### 7.3 Mantenimientos especiales (paradas de plantas, overhauls...).

- 7.3.1 ¿Las detenciones mayores son implementadas en forma ordenada bajo un modelo de gestión de grandes paradas de plantas?
- 7.3.2 ¿Las detenciones mayores son implementadas por grupos a dedicación exclusiva?
- 7.3.3 ¿Las detenciones mayores son programadas, planificadas y ejecutadas bajo el uso de herramientas de optimización de confiabilidad y riesgo?
- 7.3.4 ¿Existe un proceso de registro de las detenciones mayores que permita recopilar las lecciones aprendidas y todas las actividades son especificadas y estandarizadas?
- 7.3.5 ¿Existe una estrategia de integral de optimización de los procesos paradas de plantas, se auditan y se realizan análisis de benchmarking y de mejora continua?

### 7.4 Herramientas digitales para facilitar el análisis del costo de ciclo de vida.

- 7.4.1 ¿La empresa utiliza herramientas que permitan analizar el LCCA de un activo de forma automática?
- 7.4.2 ¿Se emplean herramientas como los Gemelos Digitales para simular diferentes escenarios de durabilidad y desempeño de los activos a lo largo del tiempo?
- 7.4.3 ¿La empresa utiliza tecnologías de simulación avanzada para modelar el comportamiento y el desempeño de activos en diferentes condiciones operativas como parte del proceso de cotización?

## 8. Proceso de revisión y mejora continua.

- 8.1.1 Control de Calidad.
- 8.1.2 ¿Existe un modelo eficiente de gestión de la calidad dentro del área de mantenimiento?

- 8.1.3 ¿Existe el conocimiento de que la calidad contribuye a la mejora del desempeño de los procesos de mantenimiento y confiabilidad?
- 8.1.4 ¿La organización del mantenimiento está alineada con los programas de mejoramiento de la calidad?
- 8.1.5 ¿La organización de mantenimiento ha sido acreditada en alguna norma relacionada con la calidad?
- 8.1.6 ¿La compañía está acreditada en alguna norma de la calidad y se ha incorporado el proceso de gestión de la calidad dentro del mantenimiento?

#### 8.2 Programas de mejora continua.

- 8.2.1 ¿Las mejoras en los procesos de mantenimiento y confiabilidad son llevadas de forma ordenada y actualizadas bajo un modelo específico?
- 8.2.2 ¿Existe un marco de referencia para incluir mejoras en los procesos de mantenimiento y confiabilidad?
- 8.2.3 ¿Existe un programa de seguimiento a las propuestas de mejoras en las áreas de mantenimiento y confiabilidad?
- 8.2.4 ¿El proceso de Mejora continua es una práctica común en las áreas mantenimiento y confiabilidad?
- 8.2.5 ¿El proceso de mejora continua es una práctica estándar de todos los negocios que conforman el proceso industrial analizado?

#### 8.3 Programas de desarrollo de personal.

- 8.3.1 ¿La organización cuenta con un departamento que se encargue del proceso de adiestramiento formal al personal de toda la organización?
- 8.3.2 ¿Se provee de adiestramiento eficiente al personal nuevo de la organización?
- 8.3.3 ¿Existe un plan de entrenamiento específico y ajustado a todo el ciclo de vida del trabajador?
- 8.3.4 ¿El programa de adiestramiento de todo el personal está adecuado al puesto de trabajo y está orientado a lograr los objetivos del negocio?
- 8.3.5 ¿El programa de entrenamiento incluye formación en las áreas de técnicas modernas de mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos?
- 8.3.6 ¿Existe un marco de referencia que incluya herramientas de la industria 4.0?

#### 8.4 Programa de digitalización.

- 8.4.1 ¿Está la dirección dispuesta a invertir en tecnologías avanzadas y liderar la transformación digital en los procesos de mantenimiento?

- 8.4.2 ¿Se cuenta con una estrategia de inversión a largo plazo para la transformación digital en los procesos de mantenimiento de la empresa?
- 8.4.3 ¿La empresa cuenta con una herramienta que permita identificar las áreas de oportunidad de mejora en el área de mantenimiento?
- 8.4.4 ¿La empresa cuenta con un proceso de adaptación cultural que se vincule a los continuos cambios que propone hoy en día las innovaciones tecnológicas en el área de mantenimiento? (Manejo del cambio).