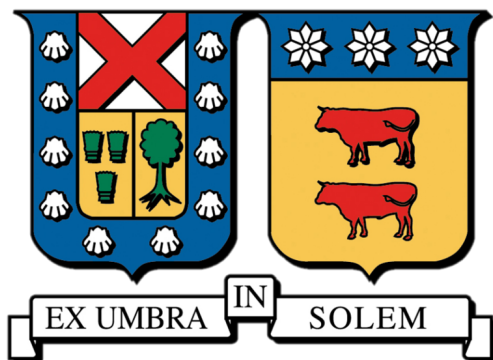


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



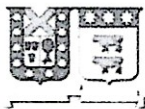
**“IDENTIFICAR Y ESTUDIAR HERRAMIENTAS DE
INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA APLICACIÓN EN
UN MODELO DE GESTIÓN DE ACTIVOS Y
MANTENIMIENTO (MGAM) DE OCHO ETAPAS”**

IGNACIO OSVALDO MARTÍNEZ FIGUEROA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : MBA Ing. RENÉ VALDENEGRO OYANEDER.
PROFESOR CORREFERENTE : DR. Ing. PEDRO SARIEGO PASTEN.

Mayo - 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: "IDENTIFICAR Y ESTUDIAR HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA APLICACIÓN EN UN MODELO DE GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO (MGAM) DE OCHO ETAPAS"

Nombre del candidato(a): Ignacio Osvaldo Martinez Figueroa

Carrera / Grado: INGENIERO CIVIL MECANICO

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: Departamento de Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, René Antonio Valdenegro Oyanader, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24/09/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24/09/2025

; Firma:

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

RESUMEN

Actualmente la tecnología de Inteligencia Artificial (IA) se está masificando en su uso en diversos ámbitos desde personales hasta industriales. En esta memoria de titulación, se identificó que herramientas de IA a la fecha desarrolladas, pueden ser aplicadas a un MODELO DE GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO (MGAM). Esto fue para conocer los alcances con los cuales prontamente se van a aplicar las tecnologías de IA a la industria en el área de mantenimiento. Además, adicionalmente se cuantificó si hay mejoras en: la toma de decisiones; reducción de tiempos de inactividad; la confiabilidad operacional y la eficiencia operativa.

Para lograr esto, primero se estudió y analizó: el estado del arte de las IA en el ámbito de la Ingeniería para luego facilitar la búsqueda de herramientas de IA que se adecúen a los propósitos de un MGAM. Continuamente, se analizó funcionalmente y procesalmente el MGAM de ocho (8) etapas; con esto se logró identificar qué funciones de las IA se deben cumplir y cómo se deben integrar en los procesos específicos del MGAM.

Posteriormente, se investigó la información disponible a nivel mundial para identificar las herramientas IA que se adecúan al MGAM. Seguidamente, se evaluó la factibilidad técnica de cada IA encontrada para determinar si la herramienta de verdad puede ser un aporte al proceso del MGAM.

Luego, se evaluó y desarrolló un modelo de integración de las IA factibles técnicamente al proceso del MGAM. A continuación, se analizaron los beneficios y desafíos de las IA en el proceso del MGAM. Posteriormente, se propuso un plan de implementación y evaluación para el modelo de IA. Finalmente, se estudiaron los beneficios productivos, económicos y técnicos de aplicar las herramientas IA al MGAM.

De acuerdo a este estudio, se concluye que las herramientas IA enumeradas se podrían integrar de manera beneficiosa a la implementación del MGAM de ocho etapas: ChatGPT, análisis de componentes principales aumentado con IA, aprendizaje de transferencia, Blockchain y modelado de información de construcción aumentado con IA.

ABSTRACT

Currently Artificial Intelligence (AI) technology is becoming widespread in its use in various areas from personal to industrial, in this degree report it was identified which AI tools developed to date, can be applied to an asset and maintenance management model (AMMM), this was to know the scope with which AI technologies will soon be applied to the industry in the maintenance area. In addition, it was additionally quantified if there are improvements in: decision-making; reduced downtime; operational reliability and operational efficiency.

To achieve this, the state of the art of AI in the field of Engineering was first studied and analyzed, and then facilitated the search for AI tools that fit the purposes of an AMMM. Continuously, the eight (8) stage AMMM was analyzed functionally and procedurally; with this, it was possible to identify which functions of the AI must be fulfilled and how they must be integrated into the specific processes of the AMMM.

Subsequently, the information was investigated globally to identify AI tools that are suitable for MGAM. Next, the technical feasibility of each AI found was evaluated to determine if the tool can really be a contribution to the AMMM process.

Then, a model for the integration of technically feasible AIs into the AMMM process was evaluated and developed. Next, the benefits and challenges of AI in the AMMM process were analyzed. Subsequently, an implementation and evaluation plan for the AI model was proposed. Finally, the productive, economic and technical benefits of applying AI tools to AMMM were studied.

According to this study, it is concluded that the AI tools listed could be beneficially integrated into the implementation of the eight-stage AMMM: ChatGPT, principal component analysis enhanced with AI, transfer learning, Blockchain and building information modeling enhanced with AI.

GLOSARIO

Activo: Es un bien que posee una empresa y que puede convertirse en dinero o en otros medios líquidos u equivalentes.

Algoritmo: Conjunto de instrucciones no ambiguas para realizar una tarea.

BigData: Base de datos masiva, que no se puede almacenar o trabajar de manera convencional.

Ciclo de vida del activo: Involucra todo lo que le sucede al activo desde su incorporación a un proyecto hasta su descarte.

Código abierto: Programa de computadora del cual su código es de acceso público.

Computer Vision: Se refiere a las técnicas que logran que un computador pueda percibir su entorno gracias a cámaras digitales.

Conocimiento hecho a mano: Forma tradicional de programar un computador para que realice tareas.

Contexto operacional: Conjunto de condiciones operativas, ambientales, sociales y legales en las cuales un activo cumple sus funciones.

Deep learning: Machine learning de datos complejos usando redes neuronales.

EBITDA: Beneficio bruto antes de impuestos, intereses, amortizaciones y depreciaciones.

ERP: (Enterprise resource planning) Sistema de software que ayuda a las organizaciones a optimizar sus procesos de negocio centrales.

Framework: Estructura conceptual y tecnológica de asistencia definida, normalmente, con artefactos o módulos concretos de software, que puede servir de base para la organización y desarrollo de software.

HSEC: (Health Security Environment Community) Conjunto de stakeholders que necesitan que sus necesidades sean cumplidas por una empresa sostenible.

HH: Horas hombre, hora que ocupa a un trabajador.

IA: Inteligencia artificial se refiere a la habilidad de las máquinas para realizar tareas que normalmente

requieren inteligencia humana.

IIoT: (Industrial internet of things) Paradigma de conectividad que sugiere que se conecten a internet de forma permanente un gran número de partes de los activos.

Jac-Knife: Técnica de re-muestreo. Es una técnica útil para la estimación del sesgo y la varianza de estimadores.

KPI: (Key Performance Indicator) Indicador clave de rendimiento. Permite medir el nivel de rendimiento de un proceso.

Machine Learning: Paradigma opuesto al conocimiento hecho a mano, logra que las IA aprendan solo proveyendo datos de entrada. En español se refiere como aprendizaje automático.

Misión: Corresponde al primer paso de la planificación estratégica, describe el concepto y la naturaleza de la organización, justifica la existencia, propósitos y funciones de esta.

MGAM: Modelo de gestión de activos y mantenimiento, es un proceso que asegura que los activos realicen sus funciones en su contexto operacional, además de lograr este propósito de manera eficiente en su costo operacional.

Red neuronal: categoría específica de algoritmos que están vagamente inspirados por las neuronas biológicas en el cerebro humano.

Software: Programa computacional no físico hecho para cumplir una o varias funciones.

Valores Organizacionales: Los valores organizacionales son los fundamentos sobre los que se apoya una compañía para abordar sus actuaciones y cómo se relaciona con todo lo que la rodea.

Visión: Corresponde al lugar en donde la organización quiere posicionarse estratégicamente en un futuro definido.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
GLOSARIO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
1 Propuesta de Metodología	15
1.1 Objetivos	15
1.2 Problema de Estudio	15
1.3 Antecedentes	16
1.4 Alcances	16
1.5 Marco teórico	16
1.5.1 Inteligencia artificial	16
1.5.1.1 ¿Qué es la IA?	17
1.5.1.2 ¿Cómo funciona la IA?	17
1.5.1.3 ¿Por qué ahora es un momento importante para la IA?	18

1.5.1.4	¿Cuáles son y en qué se diferencian los diferentes tipos de Aprendizaje Automático?	19
1.5.1.5	¿Qué son las redes neuronales y el aprendizaje profundo?	20
1.5.1.6	¿Cuáles son los pasos para construir y operar sistemas IA?	21
1.5.1.7	¿Cuáles son las limitaciones y riesgos de usar sistemas IA?	21
1.5.2	Modelo de gestión de activos y mantenimiento	22
1.5.2.1	Etapa 1:Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento	22
1.5.2.2	Etapa 2:Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento	23
1.5.2.3	Etapa 3: Jerarquización de equipos	24
1.5.2.4	Etapa 4: Análisis de puntos débiles de equipos de alto impacto	26
1.5.2.5	Etapa 5: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios	28
1.5.2.6	Etapa 6: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos	30
1.5.2.7	Etapa 7: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento	31
1.5.2.8	Etapa 8: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos.	32
2	Procedimiento de trabajo	34
3	Desarrollo	35
3.1	Etapa 1: Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento.	35
3.1.1	Large Language Model	35

3.1.1.1	Resumen IA encontrada	35
3.1.1.2	Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta	36
3.1.1.3	Adaptabilidad de la herramienta	36
3.1.1.4	Modos de falla IA	36
3.1.1.5	Plan de implementación y evaluación	36
3.1.1.6	Beneficios económicos y de eficiencia	37
3.1.1.7	Aporte real de la IA a la función	37
3.2	Etapa 2: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.	38
3.2.1	Principal Component Analysis	38
3.2.1.1	Resumen IA encontrada	38
3.2.1.2	Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta	38
3.2.1.3	Adaptabilidad de la herramienta	38
3.2.1.4	Modos de falla IA	38
3.2.1.5	Plan de implementación y evaluación	39
3.2.1.6	Beneficios económicos y de eficiencia	39
3.2.1.7	Aporte real de la IA a la función	41
3.3	Etapa 3: Jerarquización de equipos.	42
3.3.1	Big Data Knowledge Engineering	42
3.3.1.1	Resumen IA encontrada	42
3.3.1.2	Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta	42

3.3.1.3	Adaptabilidad de la herramienta	42
3.3.1.4	Modos de falla IA	42
3.3.1.5	Plan de implementación y evaluación	43
3.3.1.6	Beneficios económicos y de eficiencia	43
3.3.1.7	Aporte real de la IA a la función	43
3.4	Etapa 4: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.	44
3.4.1	Big Data Knowledge Engineering	44
3.4.1.1	Resumen IA encontrada	44
3.4.1.2	Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta	44
3.4.1.3	Adaptabilidad de la herramienta	44
3.4.1.4	Modos de falla IA	44
3.4.1.5	Plan de implementación y evaluación	45
3.4.1.6	Beneficios económicos y de eficiencia	45
3.4.1.7	Aporte real de la IA a la función	45
3.5	Etapa 5: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios	46
3.5.1	Optimización de colonia de hormigas	46
3.5.1.1	Resumen IA encontrada	46
3.5.1.2	Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta	46
3.5.1.3	Adaptabilidad de la herramienta	46
3.5.1.4	Modos de falla IA	46

3.5.1.5	Plan de implementación y evaluación	46
3.5.1.6	Beneficios económicos y de eficiencia	47
3.5.1.7	Aporte real de la IA a la función	49
3.6	Etapa 6: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos . . .	50
3.6.1	Aprendizaje de transferencia	50
3.6.1.1	Resumen IA encontrada	50
3.6.1.2	Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta	50
3.6.1.3	Adaptabilidad de la herramienta	50
3.6.1.4	Modos de falla IA	50
3.6.1.5	Plan de implementación y evaluación	51
3.6.1.6	Beneficios económicos y de eficiencia	51
3.6.1.7	Aporte real de la IA a la función	52
3.7	Etapa 7: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento	53
3.7.1	Blockchain	53
3.7.1.1	Resumen IA encontrada	53
3.7.1.2	Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta	53
3.7.1.3	Adaptabilidad de la herramienta	53
3.7.1.4	Modos de falla IA	53
3.7.1.5	Plan de implementación y evaluación	53
3.7.1.6	Beneficios económicos y de eficiencia	54

3.7.1.7	Aporte real de la IA a la función	55
3.8	Etapla 8: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos	55
3.8.1	Modelado de información de construcción	55
3.8.1.1	Resumen IA encontrada	55
3.8.1.2	Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta	55
3.8.1.3	Adaptabilidad de la herramienta	56
3.8.1.4	Modos de falla IA	56
3.8.1.5	Plan de implementación y evaluación	56
3.8.1.6	Beneficios económicos y de eficiencia	57
3.8.1.7	Aporte real de la IA a la función	58
CONCLUSIONES		59

ÍNDICE DE TABLAS

1	Estimación de costos Large Language Model. Fuente: Elaboración propia	37
2	Estimación de costos PCA. Fuente: Elaboración propia	39
3	Estimación de costos ACO. Fuente: Elaboración propia	47
4	Estimación de costos ADT. Fuente: Elaboración propia	51
5	Estimación de costos BIM. Fuente: Elaboración propia	56
6	Tabla resumen. Fuente: Elaboración propia	60

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Árbol de funciones Etapa 1:Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.	22
2	Diagrama de proceso Etapa 1:Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.	23
3	Árbol de funciones Etapa 2: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.	24
4	Diagrama de proceso Etapa 2: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.	24
5	Árbol de funciones Etapa 3: Jerarquización de equipos. Fuente: Elaboración propia.	25
6	Diagrama de proceso Etapa 3: Jerarquización de equipos. Fuente: Elaboración propia.	26
7	Árbol de funciones Etapa 4: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.	27
8	Diagrama de proceso Etapa 4: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.	27
9	Árbol de funciones Etapa 5: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios. Fuente: Elaboración propia.	28
10	Diagrama de proceso Etapa 5: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios. Fuente: Elaboración propia.	29
11	Árbol de funciones Etapa 6: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos. Fuente: Elaboración propia.	30
12	Diagrama de proceso Etapa 6: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos. Fuente: Elaboración propia.	31
13	Árbol de funciones Etapa 7: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.	32

14	Diagrama de proceso Etapa 7: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.	32
15	Árbol de funciones Etapa 8: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos. Fuente: Elaboración propia.	33
16	Diagrama de proceso Etapa 8: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos. Fuente: Elaboración propia.	34
17	Selección de KPIs y predicción de KPIs por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia	40
18	Horas Hombre selección de KPIs y predicción de KPIs por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia	41
19	Nivel de inventario repuestos por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia	48
20	Horas Hombre nivel de inventario repuestos por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia	49
21	Costo manejo de inventario repuestos por cantidad de meses. Fuente: Elaboración propia . .	52
22	Costo sistematización de recolección de información por cantidad de meses. Fuente: Elabo- ración propia	54
23	Calculo costo de ciclo de vida de activos por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia	57
24	Horas Hombre calculo de costo ciclo de vida por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia	58

INTRODUCCIÓN

Los usos de inteligencia artificial han aumentado en los últimos años en áreas como salud, automatización, conducción autónoma, manejo de BigData y con IA de uso popular como Chat GPT, Dall-e, Stable Diffusion, etcétera. Es por ello, que su uso en la "Ingeniería del mantenimiento" debe ser explorado para encontrar su posible impacto en los costos de su implementación y uso en la industria.

En la ingeniería del mantenimiento se han aplicado herramientas informáticas con rápida implementación en la industria, pasando de su desarrollo a su uso masivo en pocos años. Es por esto, que las tecnologías de IA podrían ser rápidamente adoptadas por la industria chilena.

Pero, con la implementación de IA cambiarán el uso de horas hombre de ingenieros y profesionales afines. El potencial de este cambio en reducción de costos, es el principal incentivo para implementarla. Sin embargo, también puede que se presenten mejoras en las funciones y de los procesos del MGAM.

Para lograr esto, primero se analizarán todas las funciones y procesos del MGAM en 8 etapas. Luego, se estudiará, ¿cómo las herramientas de IA pueden cumplir con estas funciones y procesos, y también cómo pueden mejorar estos?

Este trabajo de título pretende encontrar y determinar aplicaciones de IA y recomendar su implementación en el uso del MGAM.

1 Propuesta de Metodología

1.1 Objetivos

El objetivo general es analizar y desarrollar un marco de trabajo que integre herramientas de IA en un MGAM de ocho etapas, para mejorar la toma de decisiones, reducir tiempos de inactividad, aumentar la confiabilidad operacional y la eficiencia operativa.

Para el cumplimiento del objetivo general se deben alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y Analizar el estado del arte de la inteligencia artificial.
- Identificar herramientas de IA adecuadas para cada etapa del proceso del MGAM.
- Evaluar el potencial de las herramientas de IA para mejorar la eficiencia y reducir costos.
- Desarrollar un modelo de integración de IA en el proceso del MGAM.
- Analizar los beneficios y desafíos de la implementación de IA en el proceso del MGAM.
- Proponer un plan de implementación y evaluación para el modelo de IA.
- Estudiar potenciales beneficios económicos de aplicar herramientas de IA al MGAM de ocho etapas
- Concluir cuales, de las herramientas de IA evaluadas, se integrarían de manera beneficiosa, en la implementación del modelo de gestión de activos y mantenimiento.

1.2 Problema de Estudio

Dentro de las aplicaciones de la IA generativas, se reconocen algunas con usos populares e industriales. Tales como las de creación de texto e imágenes, que con la IA entrenada con visión artificial se logran detectar consecuencias negativas antes de que ocurran al analizar imágenes.

En este caso, se pretende estudiar ¿qué herramientas IA se pueden integrar a la aplicación de un MGAM?

Se busca con esto, mejorar tanto las funciones y los procesos, del MGAM, para aumentar su impacto en los KPI de gestión y en general, el EBITDA de las empresas que los use.

1.3 Antecedentes

Este trabajo es una propuesta de integración de la IA al MGAM.

Desde un punto de vista académico, se busca con esto encontrar de forma general los impactos que representaría en la implementación del MGAM.

El modelo de gestión de activos y mantenimiento a analizar es la "Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo" propuesto por: P. Viveros, R. Stegmaier, F. Kristjanpoller, L. Barbera y A. Crespo. Publicado en la revista *ingeniare* en noviembre del 2012 [Viveros et al., 2013]. Modelo el cual es enseñado por el profesor R. Valdenegro y es aplicado en la industria nacional.

1.4 Alcances

El presente trabajo busca, teóricamente, integrar herramientas de IA al proceso de mantenimiento industrial de forma genérica, sin discriminar industrias ni contexto operacional. Por lo tanto, sus resultados pueden ser aplicables a diversos rubros de la industria a nivel nacional y global.

A pesar de lo señalado en el párrafo anterior, se determina como factor limitante de su aplicación a algunas industrias que no aplican el modelo de gestión debido a su tamaño u otros motivos.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Inteligencia artificial

En esta sección se busca explicar qué es la Inteligencia Artificial para responder las siguientes preguntas.

- ¿Qué es la IA?
- ¿Cómo funciona la IA?
- ¿Por qué ahora es un momento importante para la IA?
- ¿Cuáles son y en qué se diferencian los diferentes tipos de Aprendizaje Automático?
- ¿Qué son las redes neuronales y el aprendizaje profundo?

- ¿Cuáles son los pasos para construir y operar sistemas IA?
- ¿Cuáles son las limitaciones y riesgos de usar sistemas IA?

1.5.1.1 ¿Qué es la IA?

La Real Academia Española (R.A.E.) define la IA como "Disciplina científica que se ocupa de crear programas informáticos que ejecutan operaciones comparables a las que realiza la mente humana, como el aprendizaje o el razonamiento lógico.". Pero esta definición es muy amplia, es mejor usar: "La IA se refiere a la habilidad de las máquinas para realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana."[Allen, 2020]. Aunque esta definición es más acotada, todavía incluye programas computacionales que no son considerados como IA por el público actual. Es por esto que los usos modernos de IA son los más reconocidos por el término "Aprendizaje Automático".

1.5.1.2 ¿Cómo funciona la IA?

La IA está definida por sus capacidades y no por el método por el que se lograron esas capacidades. Estos se pueden agrupar en dos categorías amplias: A saber "conocimiento hecho a mano" y "aprendizaje automático". De los dos, el más moderno es el AA (aprendizaje automático) y es el que se está usando en nuevas aplicaciones en la actualidad. Para tener una mejor idea de cómo se diferencian, a continuación se procederá a describir ambos:

- Una IA con "conocimiento hecho a mano", es la forma más antigua, cuya datación se origina de los primeros telares automatizados con tarjetas perforadas. El conocimiento hecho a mano es desarrollado por programadores y expertos en el área de estudio del programa. La inteligencia se da al programar los escenarios, una larga lista de reglas que solo es tan eficaz como el conocimiento y previsión del experto que la realiza. En esta categoría se encuentran los "sistemas expertos" y los "sistemas de control automático retroalimentados".

- Una IA con "aprendizaje automático" en cambio, no obtiene el conocimiento de reglas programadas, sino más bien crea sus propias reglas a partir de los datos de entrenamiento. El AA funciona aplicando un algoritmo generado por humanos en los datos de entrenamiento; de esta forma, el sistema de AA recibe una señal de entrada y provee una señal de salida correcta. Por lo tanto, el sistema de AA es tan bueno como

los datos de entrenamiento le provean más escenarios. Dado lo anterior, que se puedan recolectar suficientes datos es más fácil y barato construir un sistema AA que una IA con "conocimiento hecho a mano".

1.5.1.3 ¿Por qué ahora es un momento importante para la IA?

Si bien la IA ha estado presente por décadas, ¿por qué ahora la IA está en boga? La respuesta más aceptada es porque las aplicaciones en el mundo real de la IA con AA se han incrementado masivamente en los últimos veinte años; lo que se debe a cuatro factores principales que se describen a continuación:

- Primero: La existencia en la actualidad de más fuentes de datos masivos. Lo que provee a los algoritmos de AA un gran número de datos de entrenamiento para producir modelos de IA útiles. En los años 50 y 60 existían muy pocas aplicaciones con esta cantidad de datos.

- Segundo: También en la actualidad existe mayor poder computacional. A saber, los sistemas de IA con AA requieren más hardware que las aplicaciones IA de "conocimiento hecho a mano". El balance se rompió cuando alrededor de la década de 2010 se empezó a utilizar unidades de procesamiento gráfico en vez de unidades de procesamiento central. Esto es porque las unidades de procesamiento gráfico son mejores en desarrollar cálculos en paralelo, lo que lleva a que los sistemas IA con AA se puedan entrenar 10 a 20 veces más rápido que con unidades de procesamiento central. Esto lleva a que entrenar las IA sea más económico que antes.

- Tercero: La existencia de algoritmos de aprendizaje automático mejorados. A saber, los primeros algoritmos de AA tienen décadas de existencia, y aunque aún son útiles, en los años recientes, investigadores han creado muchos nuevos algoritmos, que han mejorado el estado del arte del AA. De tal forma que, como resultado, los nuevos modelos de AA son más flexibles, robustos y capaces de resolver diferentes tipos de problemas.

- Cuarto: Bibliotecas y frameworks de código abierto. De acuerdo a los puntos anteriores, el estado del arte del AA es superior al de antes, así mismo de mayor accesibilidad. Por mucho tiempo, el AA era un nicho de la ciencia de la computación, por lo que el desarrollo de sistemas de AA necesitaba pericia específica y desarrollo de software. Actualmente, sin embargo, existen muchas bibliotecas de código abierto que permiten no partir de cero y la pericia requerida es automatizada. En algunos casos, los modelos AA de código abierto pueden ser reutilizados completamente.

Debido a los factores descritos, los sistemas AA solían ser caros y complicados. Lo que recomienda los

AA de la actualidad que son prácticos y poderosos. Sin embargo, las soluciones con IA no son aplicables a todo, ya que los sistemas con AA tienen diferentes fortalezas y debilidades comparativas que el software tradicional. Además, mientras los algoritmos tradicionales fallan por llegar a casos de uso imprevistos para los desarrolladores, el AA tiende a fallar en casos fuera de sus conjuntos de entrenamiento. Por lo cual, se requiere determinar, comprendiendo esas fortalezas, debilidades y modos de falla, si el uso de IA con AA es la mejor solución para los problemas emergentes.

1.5.1.4 ¿Cuáles son y en qué se diferencian los diferentes tipos de Aprendizaje Automático?

Como la IA, el AA es un término amplio, y existen cuatro grandes familias de algoritmos de AA, que poseen también algunas subcategorías y combinaciones. Las cuatro categorías principales difieren en los tipos de datos que usan los algoritmos. Lo anterior no se refiere a si el formato de los datos son imágenes, texto, audio o números. Si no, ¿si los datos de entrenamiento están o no etiquetados? ¿cómo el sistema recibe las entradas de datos? Por lo tanto, las cuatro categorías se definen como "aprendizaje supervisado", "aprendizaje no supervisado", "aprendizaje semi-supervisado" y "aprendizaje de refuerzo":

- Aprendizaje supervisado: como su nombre lo indica, "supervisado" significa que antes de que el algoritmo procese los datos de entrenamiento, después de que un "supervisor" humano u otro software ha etiquetado de forma certera cada uno de los datos de entrada con su correcto dato de salida. Muchos sistemas de aprendizaje supervisado pueden lograr un alto desempeño, pero requieren bases de datos muy grandes para lograrlo. La adquisición de datos etiquetados puede ser automática o muy difícil dependiendo de la aplicación. A saber, que los datos pre-etiquetados solo son requeridos para entrenar a la IA; una vez entrenada, la IA va a generar sus propias etiquetas, con la precisión dependiendo de si el set de datos de entrenamiento era lo suficientemente grande, de alta calidad y representativo del contexto operacional.

- Aprendizaje no supervisado: los algoritmos no supervisados son los que pueden extraer características de los datos de entrada sin la necesidad de datos pre-etiquetados con la información de salida. Esto puede llevar a que los datos sean clasificados en categorías que no sean las deseadas para el uso de la IA. Esto permite que los sistemas de aprendizaje no supervisado sean a menudo menos predecibles. Sin embargo, las bases de datos sin etiquetas son mucho más disponibles que las etiquetadas. Adicionalmente, un algoritmo no supervisado puede llevar a comprender mejor los mismos sets de datos. Con lo cual, no es verdad que los algoritmos no supervisados sean peores que los supervisados; en cambio, los aprendizajes no supervisados sirven para solucionar distintos problemas.

- Aprendizaje semi-supervisado: en esta categoría, los algoritmos semi-supervisados combinan técnicas de los supervisados y los no supervisados para aplicaciones con un pequeño set de datos etiquetados y un gran set de datos no etiquetados. Al usarlo, se logra una combinación de las fortalezas y debilidades de los supervisados y los no supervisados.

- Aprendizaje de refuerzo: esta categoría se determina cuando los datos de entrenamiento son recolectados por un agente IA autónomo y auto-dirigido en el curso de percibir su ambiente (real o simulado) y desarrollando acciones dirigidas a cumplir metas. Estas metas cumplidas retroalimentan a las decisiones tomadas y las califica como correctas. Con esto, la IA desarrolla una política de acciones. El aprendizaje de refuerzo se usa en juegos de mesa y video, pero de momento es más desafiante usarlo en la realidad por tres razones. Primero, en el mundo real no está tan regido en términos de entradas, salidas e interacciones. Segundo, el tiempo no se puede acelerar en el mundo real. Tercero, en el mundo real hay consecuencias para las fallas. El aprendizaje de refuerzo tiene aplicaciones en la investigación, pero son menos numerosas que los otros tipos de aprendizaje.

1.5.1.5 ¿Qué son las redes neuronales y el aprendizaje profundo?

Las redes neuronales y el aprendizaje profundo han llevado a una importante mejora en el desempeño de los sistemas IA. Debido en parte a algoritmos que usan las redes neuronales.

Las redes neuronales son una categoría específica de algoritmos que están vagamente inspiradas por las neuronas biológicas en el cerebro humano. A saber, las redes neuronales profundas se refieren específicamente a las redes neuronales, que tienen muchas capas de neuronas conectadas en secuencia. Cabe resaltar que, aunque las redes neuronales están asociadas principalmente con el "aprendizaje supervisado", el "aprendizaje profundo", con la correcta arquitectura, pueden ser aplicadas en los "aprendizajes no supervisado", "semi-supervisado" y "de refuerzo".

Las redes neuronales han estado presentes desde finales de los años 50, pero entrenar con redes neuronales profundas sólo ha sido practicado desde el año 2006. Desde entonces, dado por la disponibilidad de datos, mayor capacidad de procesamiento, algoritmos mejorados y bibliotecas de código abierto. Esto ha mejorado el desempeño del aprendizaje profundo.

Es importante saber si un sistema de IA; usa redes neuronales u otro algoritmo. Lo que no va a tener muchas implicaciones importantes de cómo usar el programa. En general, a mi entender, los ejecutores de programas de IA deberían preocuparse especialmente del desempeño del sistema de IA y los tipos de datos

requeridos para este desempeño. Porque, para muchas aplicaciones, lograr ese desempeño va a requerir usar redes neuronales. Sin embargo, hay una excepción: las redes neuronales difieren de los otros tipos de algoritmos de AA. A saber, aquellas que tienden a tener poca explicabilidad. Por lo tanto, el sistema puede generar datos de salida, y la evidencia probaría que estas predicciones tienen alta precisión, pero es difícil entender o explicar por cuál mecanismo causal la red neuronal llegó a ella. Muchos otros algoritmos de AA tienen explicabilidad muy alta.

1.5.1.6 ¿Cuáles son los pasos para construir y operar sistemas IA?

Los principales pasos son:

1. Se deben seleccionar y adquirir los datos de entrada.
2. Se debe analizar los datos de entrada y evaluar cuál categoría de AA se va a utilizar.
3. Se preparan los datos de acuerdo a la categoría de AA a utilizar.
4. Se entrena y optimiza la IA para que tenga los datos de salida requeridos.
5. Se integra la IA al proceso productivo.
6. Se prueba y evalúa el desempeño de la IA.
7. Una vez que se demuestre que la IA cumple su función, se deja en operación.

1.5.1.7 ¿Cuáles son las limitaciones y riesgos de usar sistemas IA?

Hay muchos modos de falla de sistemas de AA, pero el más común es: que los datos de entrenamiento no sean representativos del contexto operacional en el cual la IA se va a desempeñar. Por esto, también es importante mantener y actualizar el entrenamiento con los cambios al contexto operacional a medida que vayan ocurriendo. De lo contrario, el sistema AA va a fallar.

Cabe resaltar, que en un contexto más amplio, aún no se definen normativas de seguridad y confiabilidad para el desarrollo, pruebas y operación de sistemas de AA. Además, cabe acotar, que algunos métodos que han sido críticos en la seguridad y confiabilidad de programas tradicionales, tales como en la verificación formal, no están disponibles para sistemas de AA. También, algunos modos de falla del AA no están completamente entendidos, incluso a nivel de investigación básica.

A pesar de los desafíos señalados, algunos sistemas de IA con AA son más seguros y de desempeño mejor que los sistemas que reemplazaron. También, aseverar que: con desarrollo e investigación actual y posiblemente la futura y con normas para su desarrollo y utilización, el AA será utilizado confiablemente en un sinnúmero de aplicaciones, incluidas las más difíciles y críticas, especialmente en los sistemas MGAM que son el tema de esta memoria.

1.5.2 Modelo de gestión de activos y mantenimiento

A continuación, se describirá brevemente cada una de las 8 etapas del MGAM. Con su análisis funcional y su respectivo diagrama de flujo de proceso.

1.5.2.1 Etapa 1: Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento

Para partir con la implementación del MGAM, se necesita establecer los propósitos de la empresa, incluyendo su "misión", "visión" y "valores organizacionales". Esto, para luego desarrollar su estrategia y construir su "plan de negocio", proponiendo una jerarquización de sus objetivos.

Una vez completado lo anterior, se pueden determinar las prioridades del área de mantenimiento.

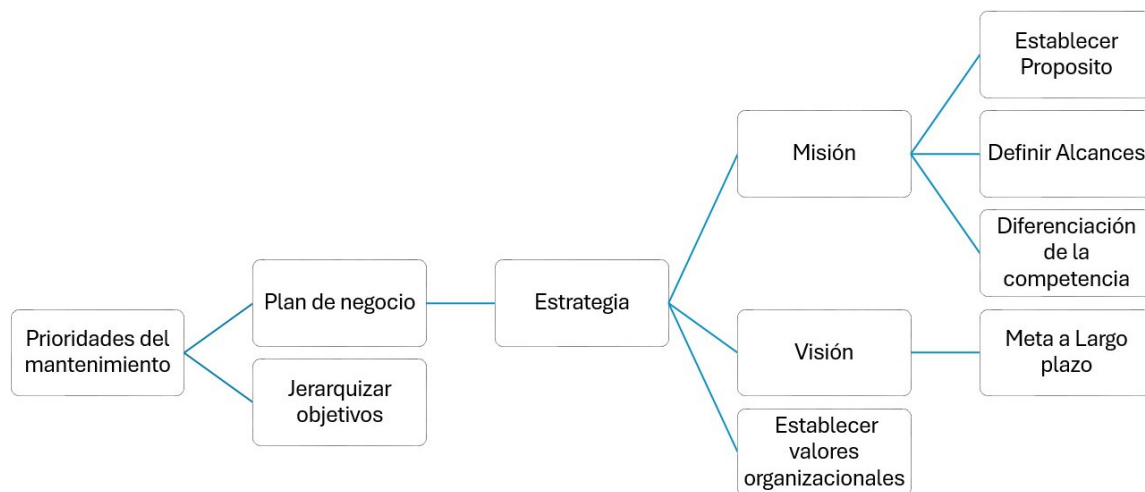


Figura 1: Árbol de funciones Etapa 1: Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

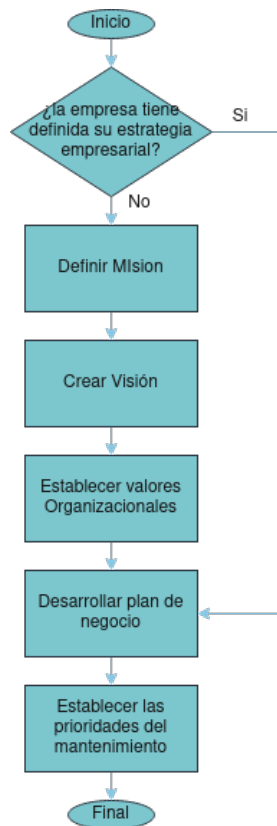


Figura 2: Diagrama de proceso Etapa 1: Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

1.5.2.2 Etapa 2: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento

En esta etapa, se debe analizar la situación actual del mantenimiento (si ya existe), desde la planificación, hasta la programación y la ejecución del mantenimiento. Para ello, se ocupan todas las herramientas disponibles (ERP, software de mantenimiento, software de gestión del mantenimiento, etcétera).

Después, se cuantifica el rendimiento de la planta y se establecen los KPI de mantenimiento objetivos; luego, se alinean las estrategias para cumplir con los objetivos y se desarrolla un plan de mantención genérico que será revisado después de completar el análisis a fondo de "criticidad de equipos".

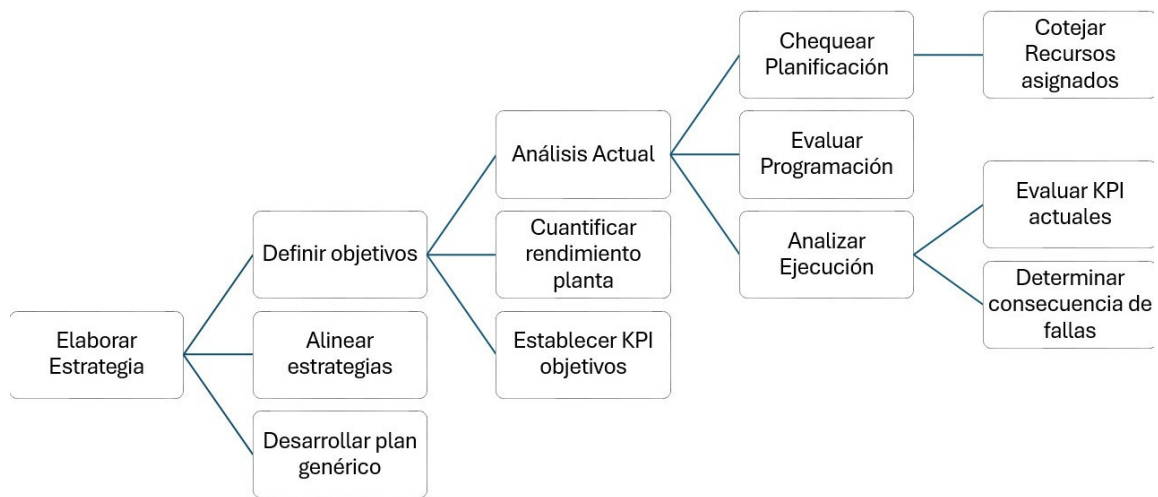


Figura 3: Árbol de funciones Etapa 2: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

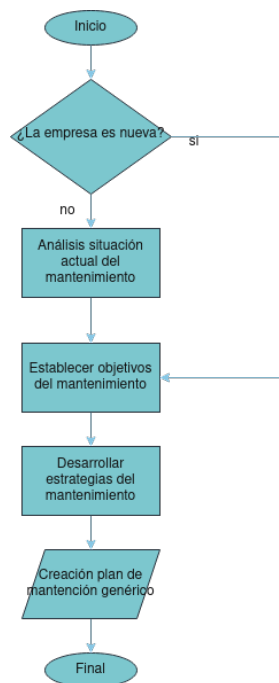


Figura 4: Diagrama de proceso Etapa 2: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

1.5.2.3 Etapa 3: Jerarquización de equipos

Esta etapa, se debe jerarquizar los equipos de acuerdo a su "criticidad", tanto en lo referente a la producción como al HSEC.

Se debe realizar un análisis funcional de cada equipo y para cada función encontrar los modos de falla y de cada modo de falla sus consecuencias. Para lograr esto, se debe analizar el informe histórico de los equipos para precisar si se puede utilizar un método más cuantitativo, (análisis "Jack-Knife" por ejemplo); en el caso contrario, se puede utilizar un método cualitativo que depende de opiniones de especialistas respecto a la consecuencia y complejidad de las fallas. Una vez analizado cada equipo, se procede a comparar su criticidad, y se establecen los equipos críticos, semi-críticos y no críticos.

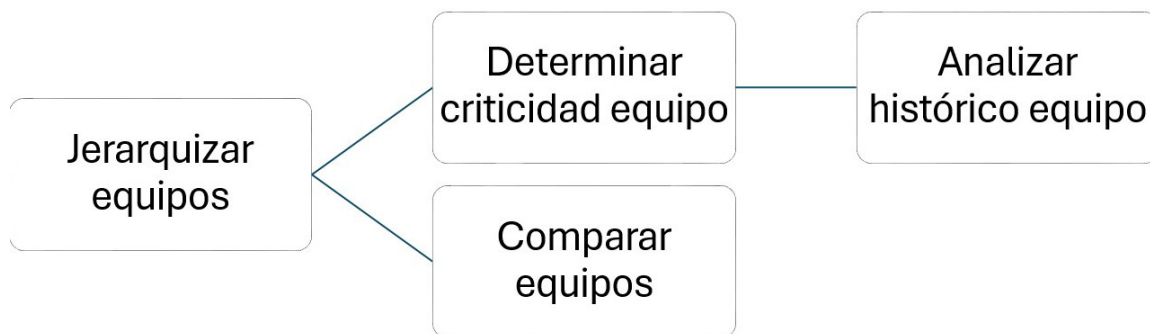


Figura 5: Árbol de funciones Etapa 3: Jerarquización de equipos. Fuente: Elaboración propia.

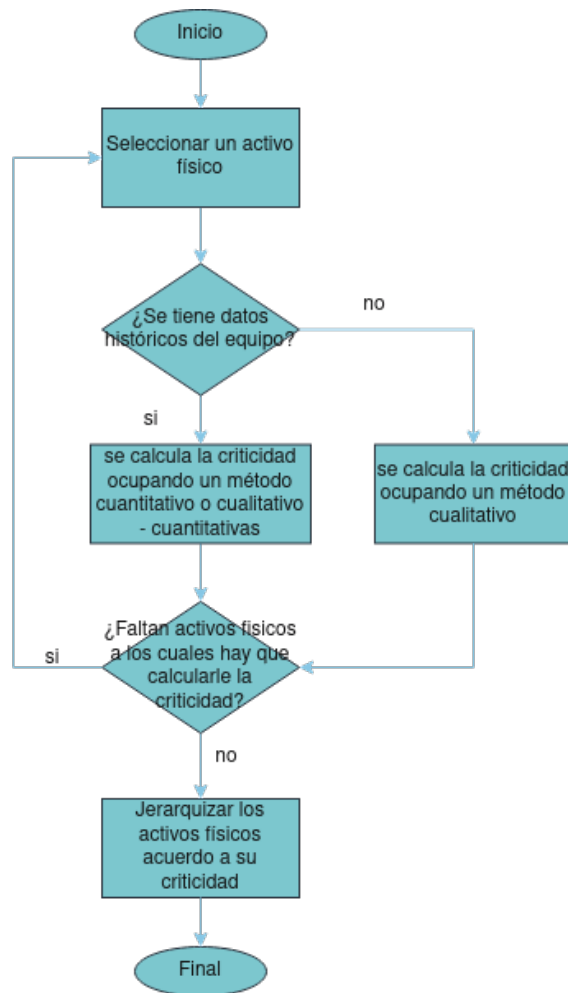


Figura 6: Diagrama de proceso Etapa 3: Jerarquización de equipos. Fuente: Elaboración propia.

1.5.2.4 Etapa 4: Análisis de puntos débiles de equipos de alto impacto

Una vez jerarquizados los equipos, se someten a una inspección detallada de los equipos críticos, mientras que a los equipos semi-críticos se les realiza una inspección superficial y al respecto, los equipos no críticos se dejan funcionar a la falla.

De acuerdo a los resultados de la inspección y al analizar el histórico de fallas de los equipos, se identifican los fallos repetitivos y los fallos crónicos. Seguidamente, se deberá proceder a encontrar la causa raíz de los fallos. Con lo cual, se encontrarán los puntos débiles de la planta.

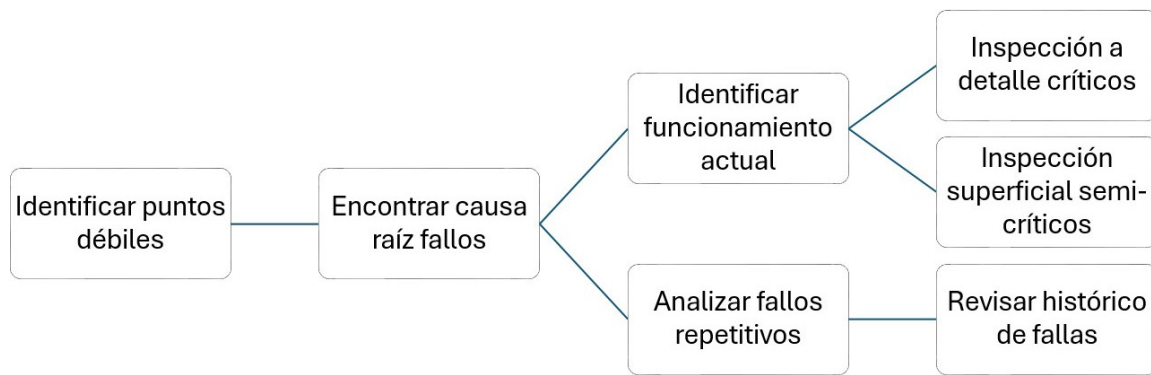


Figura 7: Árbol de funciones Etapa 4: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.

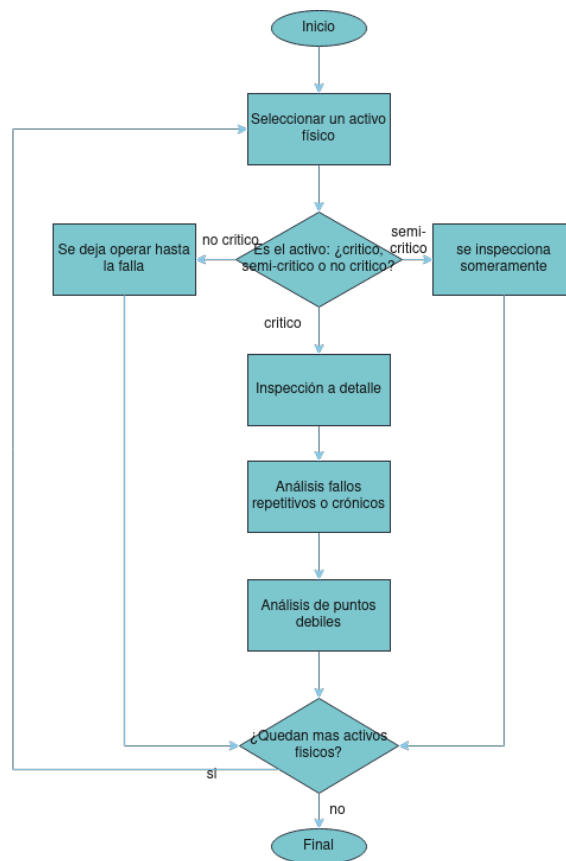


Figura 8: Diagrama de proceso Etapa 4: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.

1.5.2.5 Etapa 5: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios

Para diseñar los planes de mantenimiento, primero se deberán realizar análisis funcionales de los equipos en su contexto operacional. Posteriormente, se identificarán las posibles fallas a las funciones; los modos de falla; y su causa raíz. Finalmente, se deberán establecer las consecuencias de los fallos a los KPI del equipo y la planta.

En segundo lugar, de acuerdo al MGAM que se plantea, se deberá costear la prevención de los fallos, tomando en cuenta los repuestos a utilizar e insumos, también la actividad de mantención en sí misma y el costo de oportunidad de realizar la parada del activo.

En tercer lugar, se deberá determinar si la actividad de mantención tiene mayor beneficio que la falla. Con lo cual se debe proceder a planificar la actividad. Así mismo, esto se deberá repetir para cada actividad de mantención encontrada para cada activo.

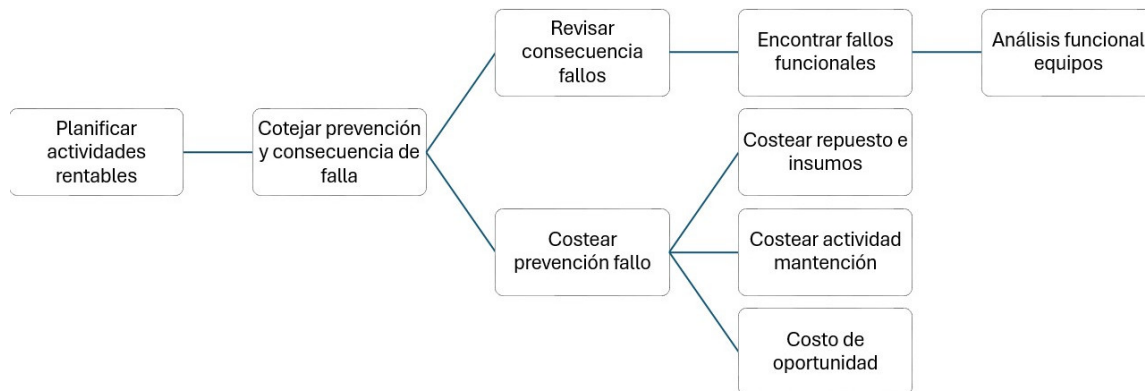


Figura 9: Árbol de funciones Etapa 5: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios. Fuente: Elaboración propia.

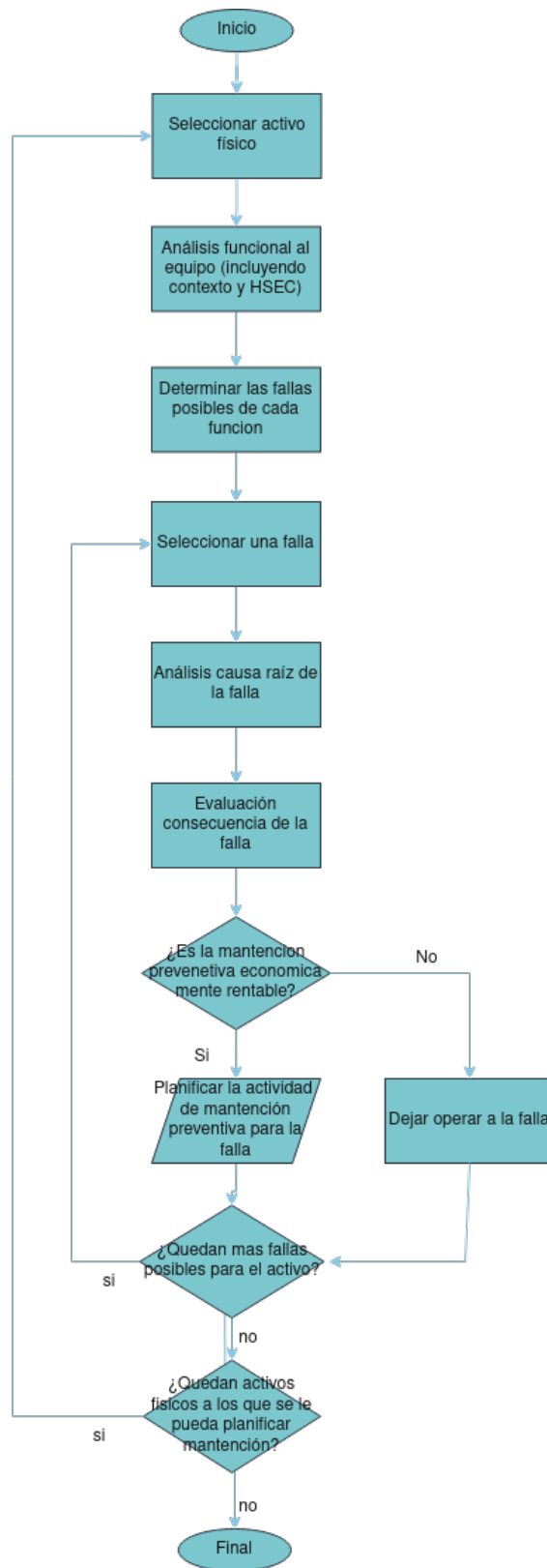


Figura 10: Diagrama de proceso Etapa 5: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios. Fuente: Elaboración propia.

1.5.2.6 Etapa 6: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos

En esta etapa, las actividades de mantenimiento planificadas, se deberán programar de forma tal que impacten en la menor medida posible a la producción. Reduciendo las pérdidas por coste de oportunidad. De igual modo, se deben optimizar el uso de recursos humanos y materiales. De acuerdo a ello, esta programación se deberá realizar teniendo presente en su implementación el corto, mediano y largo plazo.

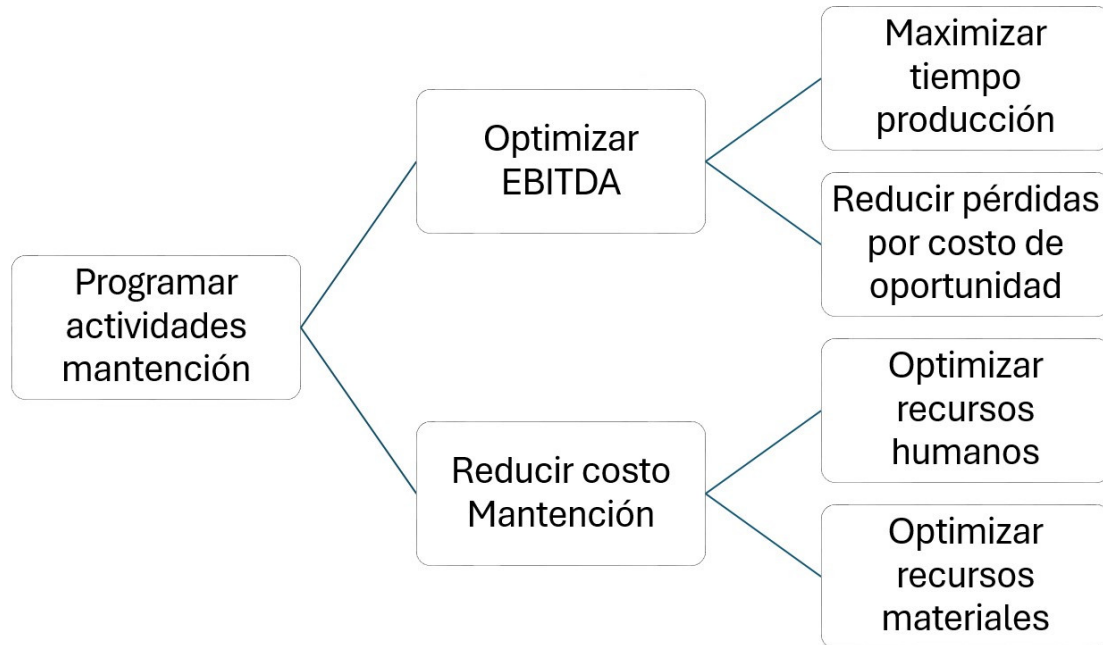


Figura 11: Árbol de funciones Etapa 6: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos. Fuente: Elaboración propia.

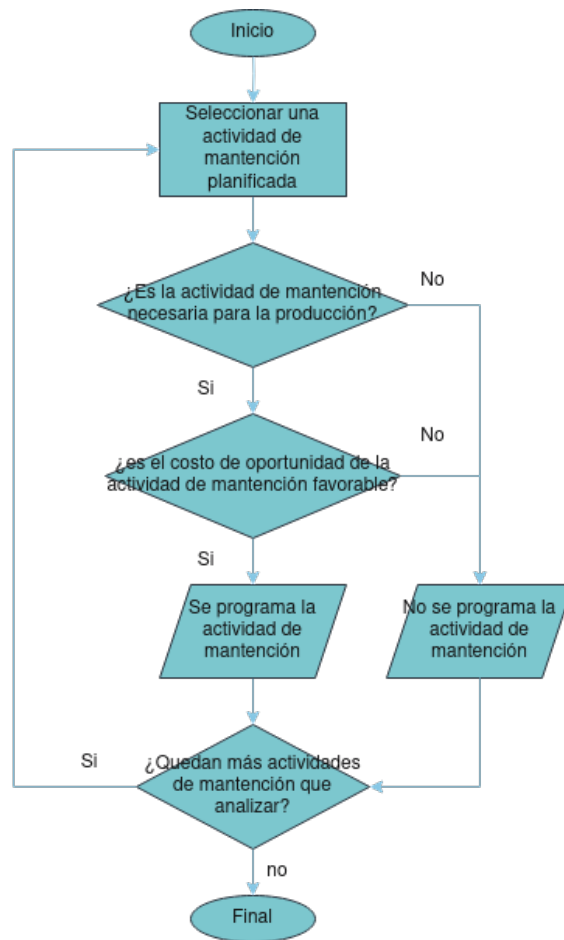


Figura 12: Diagrama de proceso Etapa 6: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos. Fuente: Elaboración propia.

1.5.2.7 Etapa 7: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento

Para lograr los objetivos de esta etapa, Se debe sistematizar la recolección de información de las actividades de mantenimiento realizadas. Para luego ser evaluadas y determinar si corresponden o no a la misma actividad cuando esta fue programada. Además, de identificar las brechas y posteriormente se deberá realimentar el plan de mantención.



Figura 13: Árbol de funciones Etapa 7: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

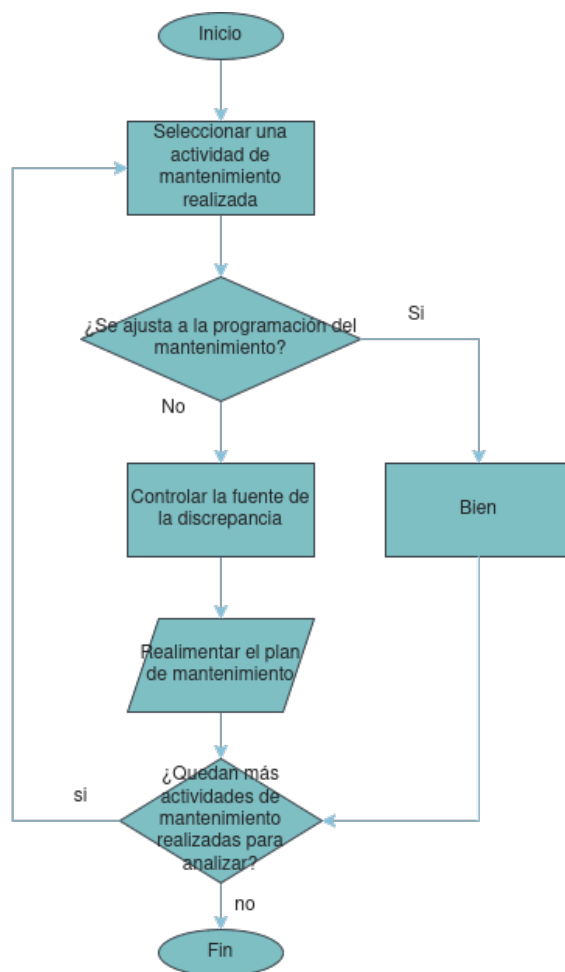


Figura 14: Diagrama de proceso Etapa 7: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

1.5.2.8 Etapa 8: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos.

Finalmente, en ésta etapa se necesita determinar el costo global del ciclo de vida de cada activo físico

instalado, para posibilitar su comparación con los costos globales de activos físicos renovados.

El costo global se determina de acuerdo: del CAPEX, el OPEX y el costo de ineficiencia proyectado para el ciclo de vida.

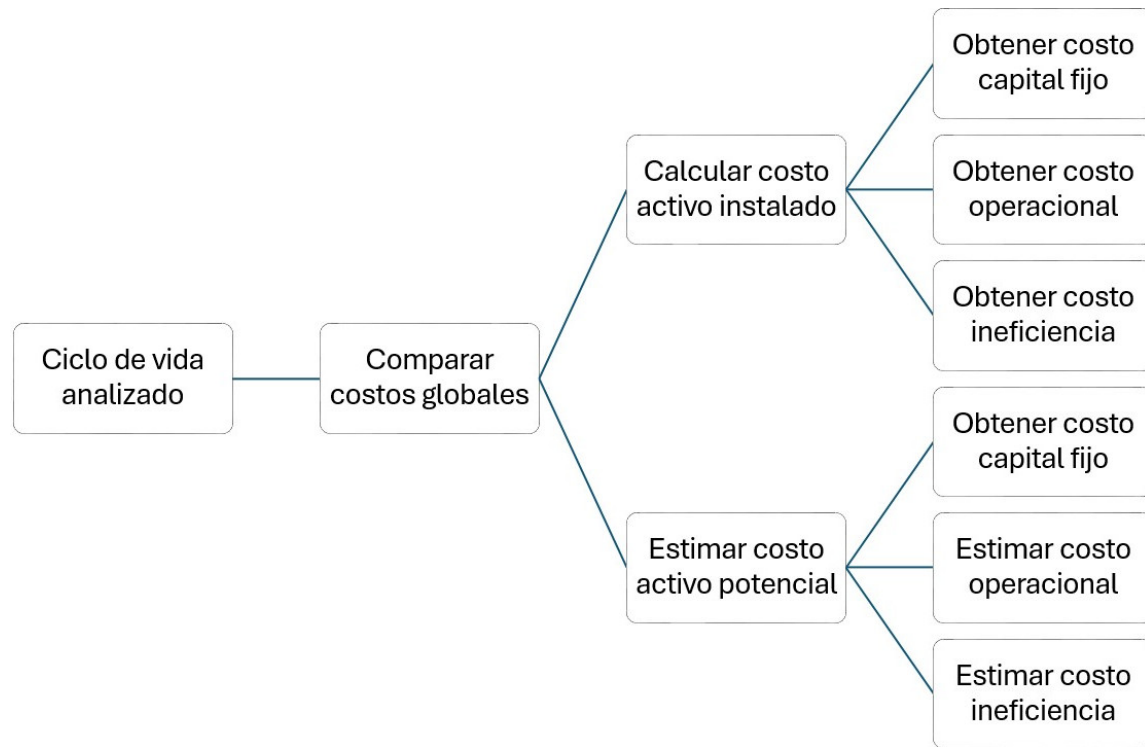


Figura 15: Árbol de funciones Etapa 8: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos.

Fuente: Elaboración propia.

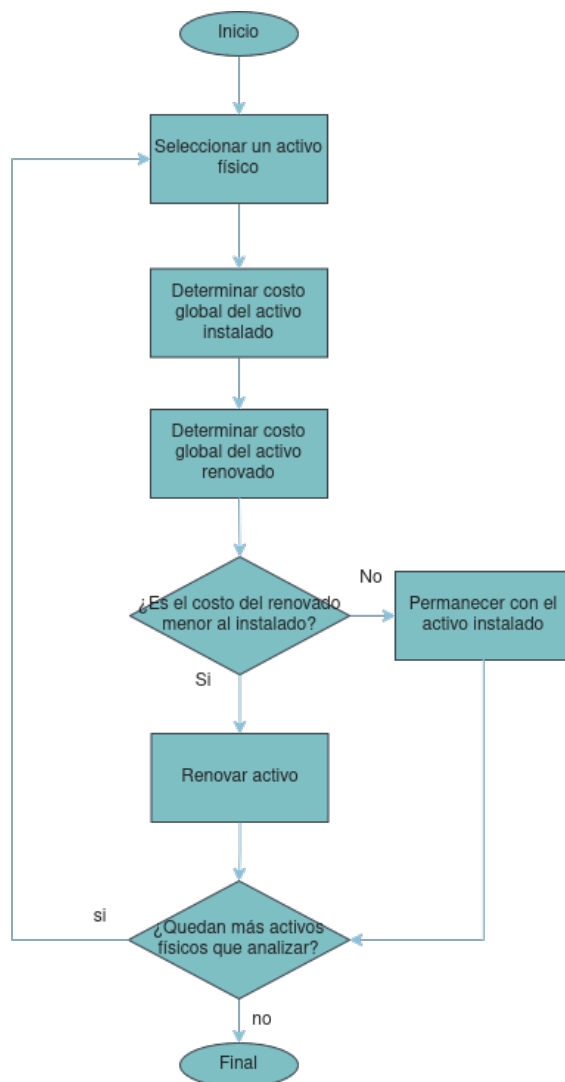


Figura 16: Diagrama de proceso Etapa 8: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos.

Fuente: Elaboración propia.

2 Procedimiento de trabajo

Para realizar este trabajo de título, se utilizaron diferentes formas de trabajo. Recurriendo a apuntes previos, referentes a tópicos similares en el desarrollo de los ramos de pregrado en los estudios en la carrera académica en la UTFSM. Asimismo, se realizaron búsquedas en documentación atingente, cuyas referencias se consignan en la bibliografía respectiva.

Primero, se realizó una búsqueda en la plataforma Scopus con los siguientes parámetros: "artificial intelligence" AND "management" AND "engineering". Luego, se rescataron los artículos que pudieran servir, en un período hasta cuatro años atrás. Seguidamente, se revisó cada uno de los artículos rescatados, buscando herramientas IA que sirvieron a cada una de las etapas del MGAM. Finalmente, se resumen las funciones de las herramientas IA encontradas y qué funciones y/o procesos del MGAM de ocho etapas, distinguiendo en cuál de estas se desarrollarían.

Segundo, se evaluó la transferibilidad y aplicabilidad de la herramienta para entender su método de uso. Luego se evaluó la adaptabilidad de la herramienta a las funciones que debe desarrollar en el proceso del MGAM de ocho etapas. Continuando, se examinó los modos de falla de la herramienta IA para comprender los desafíos de su implementación. En este contexto, si la IA no cumple con los pasos descritos, se termina su evaluación, no recomendando su uso.

Después, se propone un plan para su implementación y evaluación. Con lo cual se permite estimar el costo, logrando determinar también que en esta implementación, el modelo que sugiere, el 15% del costo corresponde a la preparación de los datos [14,]. Finalmente, en conclusión, se efectúa una evaluación general de los potenciales beneficios económicos y de eficiencia de su aplicación. Sin embargo, para llevar la anterior tarea descrita, a la fecha no se encontró una herramienta que permita evaluar potenciales IA, por lo cual se procederá a realizar una estimación de costos y horas hombre separadamente en cada función del MGAM de las ocho etapas a evaluar.

3 Desarrollo

3.1 Etapa 1: Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento.

3.1.1 Large Language Model

3.1.1.1 Resumen IA encontrada

Por desgracia, en relación al requerimiento planteado en la etapa 1 de desarrollo, no se encontró ninguna herramienta IA apropiada; sin embargo, se va a evaluar usar un Large Language Model en su lugar, para ser exacto, la IA ChatGPT.

De acuerdo a su descripción, ChatGPT es una IA que es entrenada con aprendizajes "supervisado" y de "refuerzo" que desarrolla textos de salida al ser presentada con un texto de entrada. Mientras que su redacción es acertada, a veces su contenido no es lo suficientemente preciso, si previamente no ha sido entrenada con el tema en cuestión.

Las funciones que se busca que esta IA desarrolle son definir la "misión", "visión" y establecer los "valores organizacionales".

3.1.1.2 Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta

Un LLM se aplica entregando una pregunta escrita y el LLM entrega una respuesta. Mientras que los LLM son considerados generalmente para redactar textos comunes. En nuestro caso, para redactar textos más técnicos, necesitan ser entrenados con una gran cantidad de datos. Aunque los datos son de acceso público (misión, visión y valores organizacionales), surgen dudas de que puedan producir los textos de salida con la precisión requerida para una empresa.

3.1.1.3 Adaptabilidad de la herramienta

Mientras los LLM se adaptan bien a un gran número de aplicaciones, se pone en duda su capacidad para desarrollar las funciones requeridas en el primer paso del MGAM. Dado que este paso es muy importante para las empresas y tal vez no sea un aporte real, entregar este primer paso asistido por una IA.

3.1.1.4 Modos de falla IA

De acuerdo a lo estudiado, los LLM fallan al ser consultados acerca de temas muy específicos y entregan textos que podrían ser considerados correctos en su redacción, pero contrariamente, su contenido no lo es. Por lo tanto, se va a seguir evaluando como si la IA entregara lineamientos generales y posteriormente puedan ser rectificados por seres humanos a cargo.

3.1.1.5 Plan de implementación y evaluación

Para llevar a cabo el plan de implementación y evaluación, se recomienda el siguiente procedimiento: Primero; se redacta la pregunta para obtener la "misión de la empresa", luego se trabaja sobre la respuesta de ChatGPT para corregir y completar la "misión de la empresa" requerida. Segundo; se redacta la pregunta para obtener la "visión de la empresa", y a continuación se trabaja sobre la respuesta de ChatGPT para corregir y completar la "visión de la empresa" requerida. Tercero; igualmente que en los casos anteriores se redacta la pregunta para obtener los "valores organizacionales", para finalmente trabajar sobre la respuesta de ChatGPT para corregir y completar los "valores organizacionales" adecuados y requeridos para la empresa.

3.1.1.6 Beneficios económicos y de eficiencia

Para calcular los beneficios económicos, sobre la "misión" y "visión" se estima que sin la ayuda de IA se demoraría 4 horas de gerentes, mientras que con ayuda de IA se demoraría 1 hora de gerente. Sobre los "valores organizacionales" se estima unas 10 horas gerentes sin ayuda de IA y 2 horas con ayuda de IA. El salario hipotético de gerentes se va a estimar en \$6.000.000 mensuales o \$37.500 por hora. El costo de la suscripción a ChatGPT es de 200 dólares mensuales; se estima que la "misión", "visión" y los "valores organizacionales" van a ser definidos el mismo mes.

Costo	Sin IA	Con IA
Suscripción	\$0	\$200.000
Misión	\$150.000	\$37.500
Visión	\$150.000	\$37.500
Valores organizacionales	\$375.000	\$75.000
Total	\$675.000	\$350.000

Table 1: Estimación de costos Large Language Model. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 1 el costo de realizar la "misión", "visión" y los "valores organizacionales" con ayuda de IA es beneficioso en su conjunto.

3.1.1.7 Aporte real de la IA a la función

Con el uso de ChatGPT se logra avanzar el grueso del establecimiento de los propósitos de la empresa, esto tomaría un tiempo considerable sin el apoyo de la IA, lo que es fundamental para luego poder

desarrollar las estrategias, el plan de negocios y, finalmente, determinar las prioridades del área mantenimiento.

3.2 Etapa 2: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.

3.2.1 Principal Component Analysis

3.2.1.1 Resumen IA encontrada

- Red neuronal, que usa análisis de componentes principales (PCA) para identificar KPIs, que una vez entrenada con machine learning supervisado es capaz de predecir el valor de los KPIs. El análisis de componentes principales es un método estadístico, para determinar qué variables son independientes [Mattioli et al., 2020]. Por lo que, puede ser utilizada para evaluar KPIs actuales y establecer KPIs objetivos.

3.2.1.2 Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta

El PCA se usa para determinar qué KPIs son independientes y son los relevantes para el área de mantenimiento. Posteriormente, se usa ML para entrenar una IA que ayudaría a predecir dichos KPIs necesarios para el área de mantenimiento.

3.2.1.3 Adaptabilidad de la herramienta

El PCA y la posterior IA ya han sido probadas en el área de mantenimiento, con lo cual podrían servir para ser aplicadas de manera genérica a empresas que usen el MGAM de ocho etapas.

3.2.1.4 Modos de falla IA

Como toda IA, su eficacia dependerá de la calidad de los datos, que estén actualizadas y correspondan al contexto operacional específico.

3.2.1.5 Plan de implementación y evaluación

Se recomienda el siguiente procedimiento: Primero; se recolectan todos los KPIs que se hayan obtenido de todos los equipos y se asegura que estén apropiadamente etiquetados. Posteriormente se asumirá un tiempo de preparación de los datos de 0.017 HH de un supervisor por dato, el salario hipotético del supervisor \$1.000.000 mensual o \$6.250 por hora, con una cantidad de 10 datos por KPI y 10 KPIs por activo y además 10, 20 y 40 activos para empresas pequeñas, medianas y grandes, respectivamente. Además, aplicar el PCA se considerará gratuito, salvo el costo de preparación de los datos.

Segundo; se entrenará la IA con los datos ya etiquetados anteriormente, aunque el PCA descarte algunos KPIs como dependientes de otros. Para calcular el costo de la IA (en este ejercicio) se van a considerar los datos de los 10 KPIs.

Tamaño empresa	Pequeña	Mediana	Grande
Número de activos [-]	10	20	40
Tiempo preparación datos [h]	17	34	68
Costo PCA	\$106.250	\$212.500	\$425.000
Costo implementación IA	\$708.333	\$1.416.667	\$2.833.333

Table 2: Estimación de costos PCA. Fuente: Elaboración propia

Tercero; se integra la IA al proceso productivo, estimando en datos similares a los de entrada, en los que ya se conoce la respuesta y posteriormente, se evalúa si la IA ¿tiene un desempeño aceptable?. Finalmente, si se concluye que el resultado es aceptable, la IA queda en funcionamiento.

3.2.1.6 Beneficios económicos y de eficiencia

Para calcular los beneficios económicos, sobre seleccionar KPIs y predecir KPIs relevantes al mantenimiento. Se estima que esta función será asumida por un Ingeniero durante 10 HH por activo y de 1 HH por KPI con 5 KPIs por activo, respectivamente. Por lo cual, tomando en consideración un salario de \$2.000.000

mensual ó \$12.500 la hora. Se determina que estos procedimientos tendrán un costo de \$125.000 y \$12.500, respectivamente. A continuación, se presenta un gráfico que demuestra cuándo sería conveniente aplicar la IA.

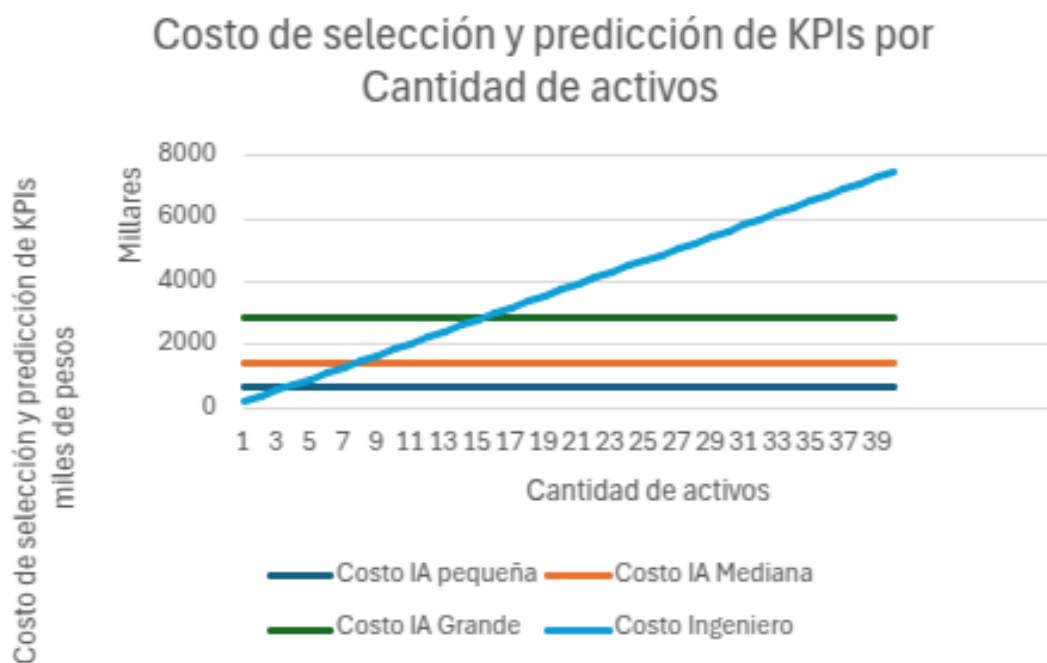


Figura 17: Selección de KPIs y predicción de KPIs por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia

Como gráfica la figura 17, el costo de la IA es inferior en los 10, 20 y 40 activos para los casos pequeño, mediano y grande, respectivamente.

Para calcular los beneficios de eficiencia, se comparan las horas hombre. Para lo cual, para introducir los datos a la IA, como se ha expuesto anteriormente, se considerará un tiempo de 0.1 HH por activo. A continuación se presenta un gráfico que muestra en qué casos sería conveniente aplicar la IA.

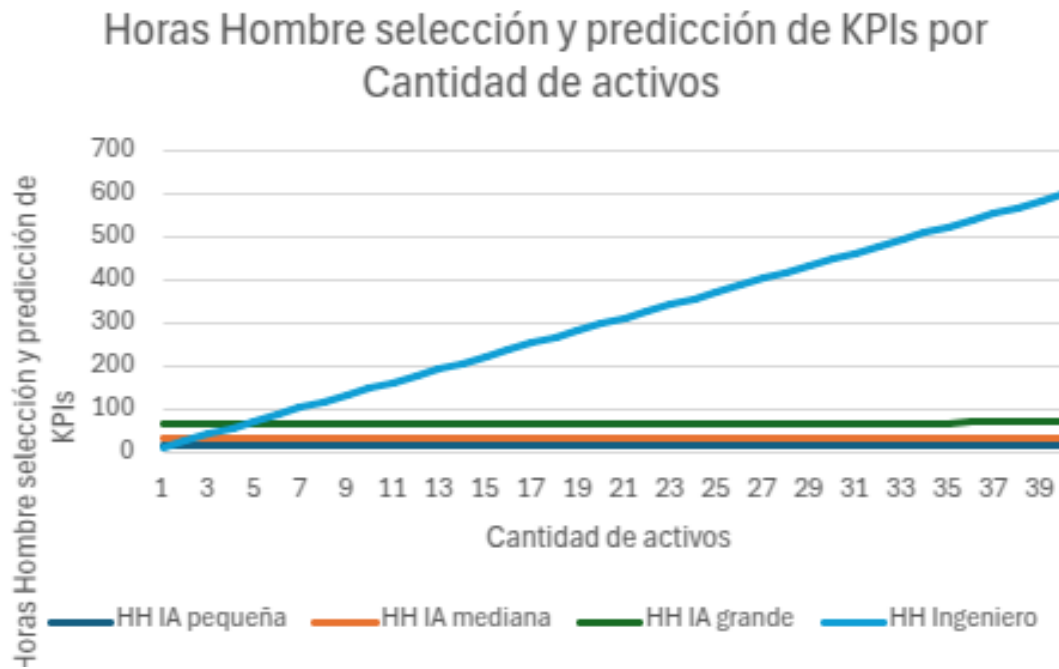


Figura 18: Horas Hombre selección de KPIs y predicción de KPIs por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia

Como se gráfica de la figura 18, la eficiencia de la IA, tiene un mejor desempeño que las HH de un ingeniero.

En conclusión, se recomienda la aplicación de PCA aumentado con IA.

3.2.1.7 Aporte real de la IA a la función

El uso del PCA permite conocer que KPIs son independientes en mantenimiento de acuerdo a su contexto operacional, esto permite estar atento a las condiciones reales de la planta. La posterior IA predice esos KPIs en el futuro, permitiendo esto estar alerta a cambios en los activos y contexto operacional.

3.3 Etapa 3: Jerarquización de equipos.

3.3.1 Big Data Knowledge Engineering

3.3.1.1 Resumen IA encontrada

- Manejo de big data usando el paradigma Big Data Knowledge Engineering (BigKE) para filtrar, manejar, almacenar y utilizar datos de puentes (vibraciones, movimiento, imágenes de corrosión, etc.). BigKE permitiría manejar los datos relevantes de la operación de los activos [Yang et al., 2022]. Por lo que puede ser utilizada para analizar el histórico del equipo.

3.3.1.2 Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta

La herramienta BigKE se aplica instalando sensores en las partes relevantes de los activos, conectándolos a internet con IIoT, almacenando y trabajando los datos de Big Data, y finalmente logrando sacar conocimiento de los datos (en tiempo real si es necesario) con BigKE. Mientras, que la aplicación original está diseñada para puentes, también puede ser utilizada para activos más genéricos.

3.3.1.3 Adaptabilidad de la herramienta

La herramienta BigKE se debería adaptar bien al cambio de función. Sin embargo, por su naturaleza, no sería de utilidad inmediata, sino en un plazo de 6 meses mínimo desde su implementación. Cabe resaltar que la empresa ahora tendría que tener almacenamiento de datos apropiado para que la herramienta pueda funcionar.

3.3.1.4 Modos de falla IA

No se reconocen modos de falla en esta herramienta a no ser que los sensores u otro factor relacionado a estos fallen.

3.3.1.5 Plan de implementación y evaluación

En este caso, se recomienda el siguiente procedimiento: Se instalan los sensores en los activos y estos se conectan a internet con IIoT, seguidamente se empiezan a almacenar los datos, luego BigKE puede empezar a manejar los datos y, pasado el tiempo (6 meses aproximadamente) puede revisar los datos requeridos, en este caso, o sea el histórico del activo. Posteriormente, para su evaluación, se debe analizar el histórico del activo con otro método y comprobar que los datos entregados sean los mismos. Una vez verificado lo anterior, la herramienta BigKE queda en funcionamiento.

3.3.1.6 Beneficios económicos y de eficiencia

Actualmente, al momento de revisar esta herramienta BigKE no hay una fórmula para estimar el costo de su implementación, que esté en el alcance de esta memoria; sin embargo, revisando en soluciones de IoT se puede estimar que el costo se encontraría en las decenas de millones de pesos.

También, como las funciones de la herramienta BigKE exceden lo requerido para ser aplicadas en el MGAM de ocho etapas, no hay forma de hacer una comparación justa que quede dentro del alcance de esta memoria.

En conclusión, esta herramienta debe ser revisada en un contexto más amplio para su aplicación en la producción y mantención en una empresa.

3.3.1.7 Aporte real de la IA a la función

La aplicación de IIoT ayuda directamente a la producción y mantención entregando datos en tiempo real de la condición de los activos. Mientras que BigKE va a permitir analizar estos datos para determinar cuáles de estos son críticos a la producción y al HSEC.

3.4 Etapa 4: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.

3.4.1 Big Data Knowledge Engineering

3.4.1.1 Resumen IA encontrada

- Manejo de big data usando el paradigma Big Data Knowledge Engineering (BigKE) para filtrar, manejar, almacenar y utilizar datos de puentes (vibraciones, movimiento, imágenes de corrosión, etc.). BigKE permitiría manejar los datos relevantes de la operación de los activos [Yang et al., 2022]. Por lo que puede ser utilizada para revisar el histórico de fallas, analizar fallos repetitivos y encontrar causa raíz de los fallos.

3.4.1.2 Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta

La herramienta BigKE se aplica instalando sensores en las partes relevantes de los activos, conectándolos a internet con IIoT, almacenando y trabajando los datos de Big Data, y finalmente logrando sacar conocimiento de los datos (en tiempo real si es necesario) con BigKE. Mientras, que la aplicación original está diseñada para puentes, también puede ser utilizada para activos más genéricos.

3.4.1.3 Adaptabilidad de la herramienta

La herramienta BigKE se debería adaptar bien al cambio de función. Sin embargo, por su naturaleza, no sería de utilidad inmediata, sino en un plazo de 6 meses mínimo desde su implementación. Cabe resaltar que la empresa ahora tendría que tener almacenamiento de datos apropiado para que la herramienta pueda funcionar.

3.4.1.4 Modos de falla IA

No se reconocen modos de falla en esta herramienta a no ser que los sensores u otro factor relacionado a estos fallen.

3.4.1.5 Plan de implementación y evaluación

En este caso, se recomienda el siguiente procedimiento: Se instalan los sensores en los activos y estos se conectan a internet con IIoT, seguidamente se empiezan a almacenar los datos, luego BigKE puede empezar a manejar los datos y, pasado el tiempo (6 meses aproximadamente) puede revisar los datos requeridos, en este caso, o sea el histórico de fallas, analizar fallos repetitivos y encontrar causa raíz de los fallos. Posteriormente, para su evaluación, se debe analizar el histórico del activo con otro método y comprobar que los datos entregados sean los mismos. Una vez verificado lo anterior, la herramienta BigKE queda en funcionamiento.

3.4.1.6 Beneficios económicos y de eficiencia

Actualmente, al momento de revisar esta herramienta BigKE no hay una fórmula para estimar el costo de su implementación, que esté en el alcance de esta memoria; sin embargo, revisando en soluciones de IoT se puede estimar que el costo se encontraría en las decenas de millones de pesos.

También, como las funciones de la herramienta BigKE exceden lo requerido para ser aplicadas en el MGAM de ocho etapas, no hay forma de hacer una comparación justa que quede dentro del alcance de esta memoria.

En conclusión, esta herramienta debe ser revisada en un contexto más amplio para su aplicación en la producción y mantención en una empresa.

3.4.1.7 Aporte real de la IA a la función

La aplicación de IIoT ayuda directamente a la producción y mantención entregando datos en tiempo real de la condición de los activos. Mientras que BigKE va a permitir analizar estos datos para determinar cuáles de estos fallos son repetitivos o crónicos y encontrar la causa raíz de estos, con esto identificando los puntos débiles de los equipos de alto impacto.

3.5 Etapa 5: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios

3.5.1 Optimización de colonia de hormigas

3.5.1.1 Resumen IA encontrada

-Optimización de Colonia de Hormigas ACO para: manejo de inventario, ruta de transporte, programación de producción, pronosticar la demanda y selección de proveedores [Mahat et al., 2023]. Por lo que puede ser utilizada para costear repuestos e insumos.

3.5.1.2 Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta

La herramienta ACO se aplica recolectando la información relevante del sistema, luego configurando los parámetros que son: "número de hormigas", "la velocidad en que se disipan las feromonas" y "el radio de exploración a explotación". Seguidamente se aplica el algoritmo ACO y modelando el comportamiento de las hormigas, establece los niveles de inventario necesarios. La aplicación original está diseñada para logística en ingeniería mecánica, por lo que su aplicación en inventario de repuestos no debería ser difícil.

3.5.1.3 Adaptabilidad de la herramienta

La herramienta ACO se debería adaptar bien a la función. Sin embargo, por la calidad de datos requeridos, necesitaría ser de una área de mantenimiento que ya esté en funcionamiento.

3.5.1.4 Modos de falla IA

Como toda IA, necesita que los datos sean del contexto operacional actual del área de mantenimiento; de lo contrario, los datos de salida no serían útiles.

3.5.1.5 Plan de implementación y evaluación

Se recomienda el siguiente procedimiento: Primero, se seleccionan los datos de entrada; en este caso, se trataría de los inventarios de repuestos e insumos requeridos para las diversas actividades de mantenimiento. Posteriormente, se asumirá un tiempo de preparación de los datos de 0.017 HH de un supervisor por dato, el salario hipotético del supervisor \$1.000.000 mensual o \$6.250 por hora, con una cantidad de datos de 10 por repuesto, 10 repuestos por activo y además 10, 20 y 40 activos para empresas pequeñas, medianas y grandes, respectivamente.

Tamaño empresa	Pequeña	Mediana	Grande
Número de activos [-]	10	20	40
Tiempo preparación datos [h]	17	34	68
Costo preparación datos	\$106.250	\$212.500	\$425.000
Costo implementación IA	\$708.333	\$1.416.667	\$2.833.333

Table 3: Estimación de costos ACO. Fuente: Elaboración propia

Segundo, se seleccionarán los parámetros del ACO. Tercero, se entrenará la IA. Cuarto, se integra la IA al proceso productivo, estimando en datos de repuestos que ya se conozcan su nivel de aprovisionamiento óptimo; si la respuesta es la misma, la IA queda en funcionamiento.

3.5.1.6 Beneficios económicos y de eficiencia

Para calcular los beneficios económicos, sobre el nivel de inventario de repuestos. Se estima que esta función será asumida por un Ingeniero durante 0.5 HH por repuesto y de 10 repuestos por activo. Por lo cual, tomando en consideración un salario de \$2.000.000 mensual ó \$12.500 la hora. Se determina que este procedimiento tendrá un costo de \$62.500. A continuación, se presenta un gráfico que demuestra cuándo sería conveniente aplicar la IA.

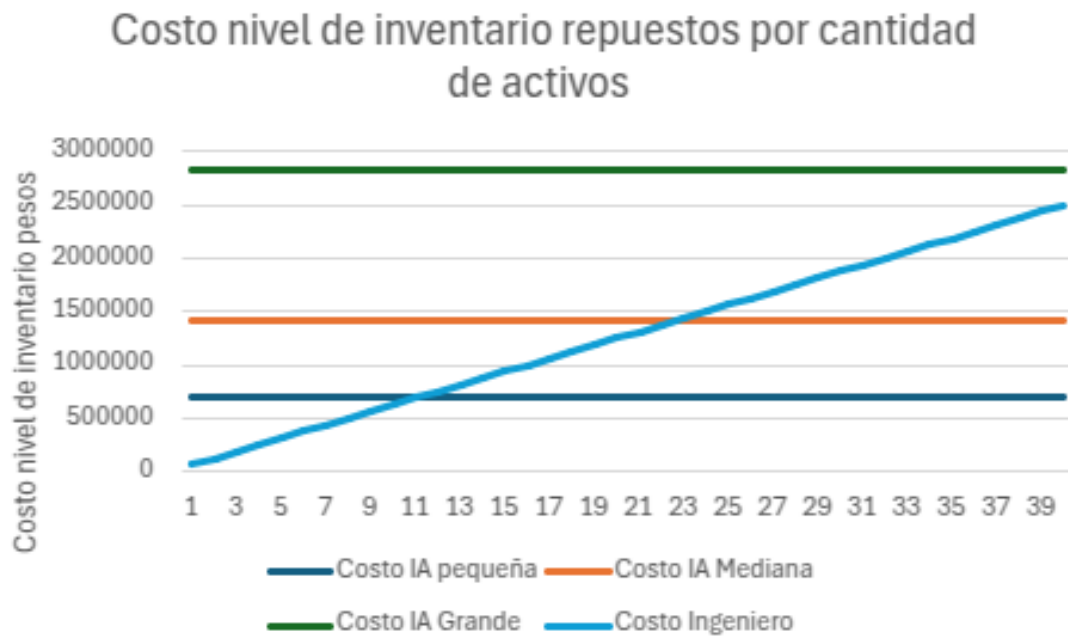


Figura 19: Nivel de inventario repuestos por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia

Como gráfica la figura 19, el costo de la IA es superior en los 10, 20 y 40 activos para los casos pequeño, mediano y grande, respectivamente.

Para calcular los beneficios de eficiencia, se comparan las horas hombre. Para lo cual, para introducir los datos a la IA, como se ha expuesto anteriormente, se considerará un tiempo de 0.1 HH por activo. A continuación se presenta un gráfico que muestra en qué casos sería conveniente aplicar la IA.

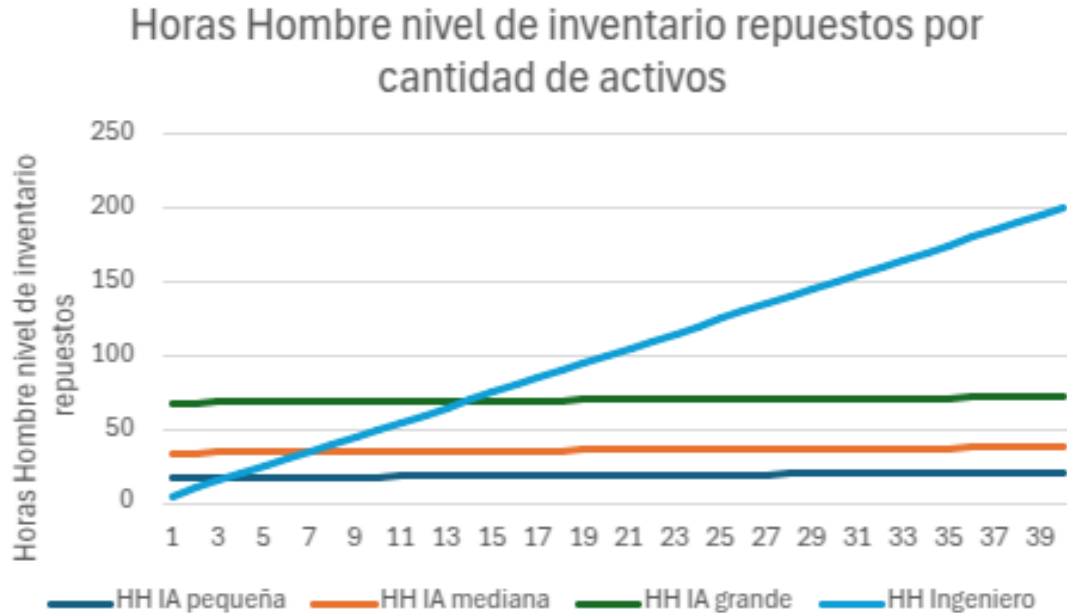


Figura 20: Horas Hombre nivel de inventario repuestos por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia

Como se gráfica en la figura 20, la eficiencia de la IA, tiene un mejor desempeño que las HH de un ingeniero.

En conclusión, habría que revisar si las horas hombre de ingeniero podrían ser mejor utilizadas en otras labores para contrarrestar el mayor costo de la herramienta ACO.

3.5.1.7 Aporte real de la IA a la función

Si bien ACO no logra generar los planes matrices de mantención, sin embargo, logra optimizar el costo de inventario de repuestos del área mantención para cada activo, lo que ayudaría a que las actividades de mantenimiento planificadas sean más económicas.

3.6 Etapa 6: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos

3.6.1 Aprendizaje de transferencia

3.6.1.1 Resumen IA encontrada

- Aprendizaje de transferencia para controlar inventario de repuestos de barcos, el aprendizaje de transferencia es una técnica para entrenar eficientemente aprendizajes automáticos y aprendizajes profundos aplicando el conocimiento de una IA ya entrenada a una nueva IA con un problema parecido [Lee et al., 2023]. Por lo que puede ser utilizada para optimizar el uso de recursos materiales.

3.6.1.2 Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta

La herramienta ADT funciona identificando individualmente los repuestos en el inventario para poder acceder a ellos de manera automática. Para hacer esto, debe ser entrenada en reconocer los repuestos visualmente mediante análisis de imágenes. El punto del ADT es que lograría identificar repuestos con menos datos de entrenamiento mientras más repuestos individuales hayan sido ingresados a la herramienta. La aplicación original está diseñada para repuestos de barcos en almacenes automatizados, por lo que su aplicación en repuestos genéricos no debería ser difícil.

3.6.1.3 Adaptabilidad de la herramienta

La herramienta ADT se debería adaptar bien al cambio de función. Y por su naturaleza, haría posible automatizar el inventario de repuestos e insumos, de cualquier tamaño de empresa.

3.6.1.4 Modos de falla IA

Además de la calidad de imagen en los datos de entrenamiento, se debe tener un nivel apropiado de luz en la aplicación final.

3.6.1.5 Plan de implementación y evaluación

Se recomienda el siguiente procedimiento: Primero, se seleccionan los datos de entrada; en este caso, se trataría de las imágenes de los inventarios de repuestos e insumos requeridos para las diversas actividades de mantenimiento. Posteriormente, se asumirá un tiempo de preparación de los datos de 0.05 HH de un supervisor por dato, el salario hipotético del supervisor \$1.000.000 mensual o \$6.250 por hora, con una cantidad de datos de 10 por repuesto en el primer activo y 5 en los siguientes, 10 repuestos por activo y además 10, 20 y 40 activos para empresas pequeñas, medianas y grandes, respectivamente.

Tamaño empresa	Pequeña	Mediana	Grande
Número de activos [-]	10	20	40
Tiempo preparación datos [h]	27,5	52,5	102,5
Costo preparación datos	\$171.875	\$328.125	\$640.625
Costo implementación IA	\$1.145.833	\$2.187.500	\$4.270.833

Table 4: Estimación de costos ADT. Fuente: Elaboración propia

Segundo, se entrenará la IA con las imágenes. Tercero, se integra la IA al proceso productivo, buscando que reconozca los repuestos; si lo logra con exactitud, la IA queda en funcionamiento.

3.6.1.6 Beneficios económicos y de eficiencia

Para calcular los beneficios económicos, sobre manejar inventarios de repuestos. Se estima que esta función será asumida por un pañolero durante todo el mes. Por lo cual, tomando en consideración un salario de \$650.000 mensual. A continuación se presenta un gráfico que demuestra en cuánto tiempo la IA tiene un retorno de la inversión.

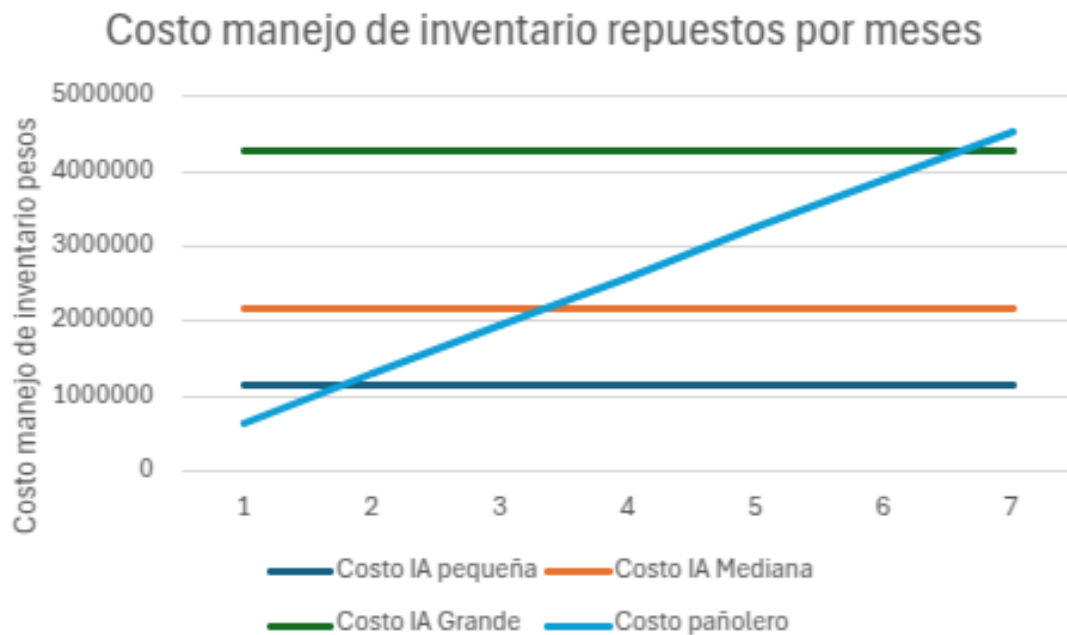


Figura 21: Costo manejo de inventario repuestos por cantidad de meses. Fuente: Elaboración propia

Como se gráfica en la figura 21, la IA regresa su inversión pasados los 2, 4 y 7 meses para los casos pequeño, mediano y grande, respectivamente.

Como la IA en todos los casos sería más eficiente en Horas Hombre, antes de pasar un mes completo no se va a presentar un gráfico.

En conclusión, se recomienda la aplicación de la herramienta ADT.

3.6.1.7 Aporte real de la IA a la función

Transfer learning, al permitir una bodega de repuestos automatizada, va a reducir tiempos de espera en lo que era el antiguo pañol, reduciendo esto el costo de las actividades de mantenimiento.

3.7 Etapa 7: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento

3.7.1 Blockchain

3.7.1.1 Resumen IA encontrada

- Blockchain para mejorar logística y administración. Blockchain permite recolectar y almacenar datos inmutables de manera no centralizada, y permite generar transparencia y confianza. [Abdulrahman et al., 2023]. Por lo que puede ser utilizada para sistematizar la recolección de información.

3.7.1.2 Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta

La herramienta Blockchain funciona dejando un registro detallado e inmutable de las "transacciones" internas de la empresa, por ejemplo, el repuesto x fue instalado en el activo z a las 12:00 de tal fecha por el mantenedor w. Esto crea datos etiquetados que pueden ser utilizados directamente por una IA. Mientras el paper habla del uso en la industria aeroespacial, su aplicación en industrias genéricas no debería ser un problema.

3.7.1.3 Adaptabilidad de la herramienta

La herramienta Blockchain debería adaptarse bien a su función. Sin embargo, el personal podría tardar tiempo en acostumbrarse a registrar cada "transacción". Debería ser útil para empresas de cualquier tamaño.

3.7.1.4 Modos de falla IA

Problemas de conectividad podrían dañar el registro de las "transacciones".

3.7.1.5 Plan de implementación y evaluación

Se recomienda el siguiente procedimiento: Primero, se desarrolla una prueba de concepto; en este caso, se trataría de las "transacciones" entre la bodega de mantenimiento y los activos. Segundo, se desarrolla y prueba la solución de blockchain, para la prueba se recomienda revisar que las "transacciones" sean las correctas a mano. Tercero, se incorpora la solución blockchain al proceso productivo, creando datos para otras IA.

3.7.1.6 Beneficios económicos y de eficiencia

Para calcular los beneficios económicos, de la sistematización de recolección de información. Se estima que esta función sería asumida por una ERP, costo hipotético de la ERP es \$1.500.000 mensual. Mientras que la solución blockchain va a costar alrededor de \$10.000.000 [15,] con un costo de mantención del 0,25 anual. Nota: se sabe que tanto la ERP como la solución blockchain desarrollan otras funciones, lo que haría que esta comparación no sea ni justa ni esté dentro del alcance de esta memoria. A continuación se presenta un gráfico para mostrar cuándo habría un retorno de la inversión de la solución blockchain.

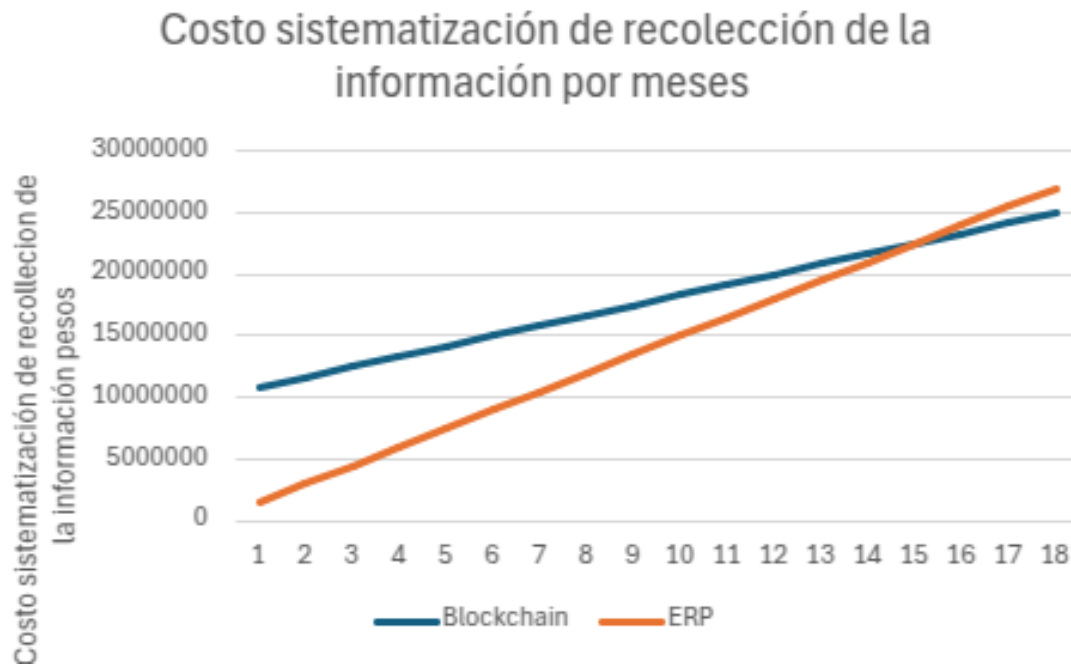


Figura 22: Costo sistematización de recolección de información por cantidad de meses. Fuente: Elaboración propia

Como se gráfica en la figura 22, la solución de blockchain regresa su inversión pasados los 15 meses.

Para calcular los beneficios de eficiencia sería muy difícil acotar los beneficios de blockchain a esta función, es por esto que se asume que sería beneficioso para la eficiencia de la empresa.

En conclusión, se recomienda la aplicación de una solución de blockchain.

3.7.1.7 Aporte real de la IA a la función

Blockchain va a permitir automatizar la recolección de información de las actividades de mantenimiento (entre otras) para poder ser evaluadas objetivamente. En cualquier momento debido a la naturaleza inmutable de los datos.

3.8 Etapa 8: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos

3.8.1 Modelado de información de construcción

3.8.1.1 Resumen IA encontrada

- Modelado de información de construcción (BIM) para analizar el costo de ciclo de vida de proyectos de transmisión de energía con un error menor al 7,5%. Utilizando software CAD se dibujan los componentes estructurales y activos fijos del sistema y la IA entrega el costo de ciclo de vida del proyecto. La IA está entrenada con ML de los costos reales de otros proyectos [Xu et al., 2021]. Por lo que puede utilizarse para calcular costos globales de los activos renovados.

3.8.1.2 Transferibilidad y/o aplicabilidad de la herramienta

La herramienta BIM se aplica dibujando en CAD los componentes estructurales y activos fijos del sistema, lo que le permite a la IA entregar el valor del ciclo de vida de los activos renovados. Esta IA usa un AA supervisado. Mientras que la aplicación original está diseñada para proyectos de transmisión de energía, también puede ser utilizada para activos más genéricos. Pero necesitaría datos para ser entrenada en la nueva aplicación; estos datos que son el costo de ciclo de vida de activos tendrían que ser apropiados en cantidad de activos y a lo largo del tiempo para obtener predicciones certeras en el costo de ciclo de vida de los activos

renovados.

3.8.1.3 Adaptabilidad de la herramienta

La herramienta BIM se debería adaptar bien al cambio de función. Sin embargo, por la calidad de datos requeridos, podría solo ser útil para empresas grandes con los datos suficientes o una empresa que se dedique a evaluar proyectos de otras empresas y que ésta sea contratada para estimar los costos de los activos físicos renovados.

3.8.1.4 Modos de falla IA

Además de la cantidad de datos para entrenar la IA, otro modo de falla puede ser que los activos fijos no estén propiamente etiquetados, alterando los valores estimados de los activos renovados. Dependiendo del uso que se le quiera dar a la información, tal vez el margen de error no sea suficiente para tomar la decisión correcta.

3.8.1.5 Plan de implementación y evaluación

Se recomienda el siguiente procedimiento: Primero, se seleccionan los datos de entrada; en este caso, se trata del costo de ciclo de vida de activos físicos instalados en otros proyectos. Cómo los datos deben estar etiquetados, se espera un tiempo de 0.1 de la HH de un supervisor por dato (salario hipotético del supervisor \$1.000.000 mensual ó \$6.250 por hora, con una cantidad de datos requerida de al menos 10 datos por tipo de activo; además de considerar 5, 10 y 20 tipos de activos para empresas pequeñas, medianas y grandes, respectivamente.

Tamaño empresa	Pequeña	Mediana	Grande
Tipo de activos [-]	5	10	20
Tiempo preparación datos [h]	5	10	20
Costo de preparación datos	\$31.250	\$62.500	\$125.000
Costo implementación IA	\$208.333	\$416.667	\$833.333

Table 5: Estimación de costos BIM. Fuente: Elaboración propia

Segundo, se entrenará la IA; estimando un tiempo de entrenamiento corto por la poca cantidad de datos a ingresar. Tercero, se integra la IA al proceso productivo, estimando en datos similares a los de la entrada, en los que ya se conoce la respuesta y posteriormente, se evalúa si la IA ¿tiene un desempeño aceptable?. Si se concluye que el resultado es aceptable, el margen de error la IA queda en funcionamiento.

3.8.1.6 Beneficios económicos y de eficiencia

Para calcular los beneficios económicos, sobre el costo de ciclo de vida de un activo renovado. Se estima que esta función será asumida por un ingeniero durante 3 horas. Por lo cual tomando en consideración un salario de \$2.000.000 mensual ó \$12.500 la hora. Se determina que este procedimiento tendrá un costo de \$37.500. A continuación, se presenta un gráfico que demuestra cuándo sería conveniente aplicar la IA.

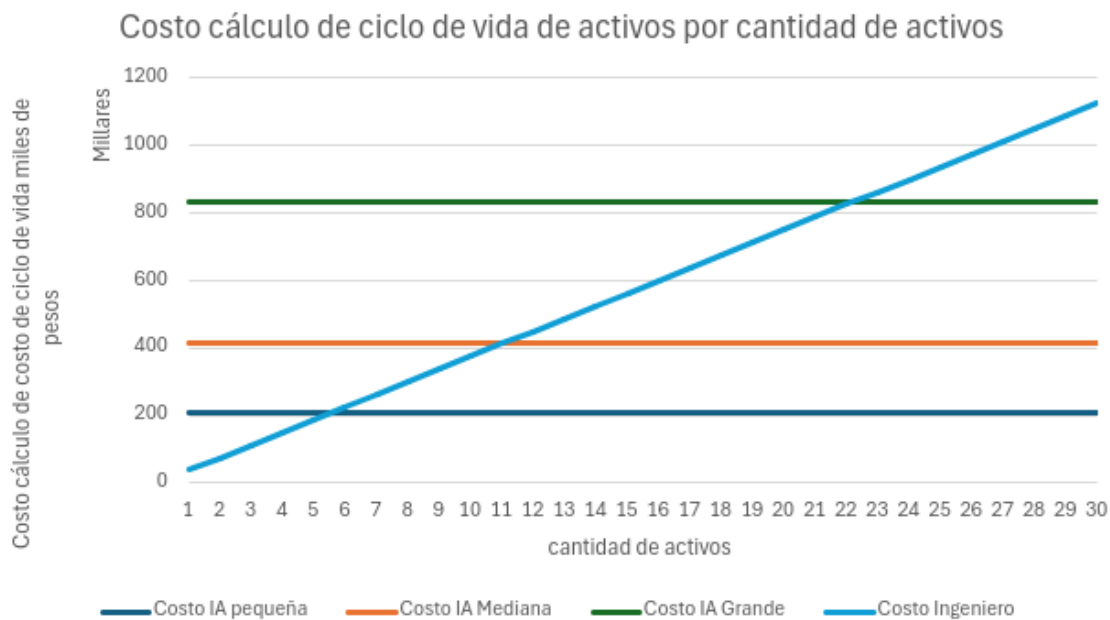


Figura 23: Calculo costo de ciclo de vida de activos por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia

Como muestra la figura 23, el costo de la IA es menor pasados los 6, 12 y 23 activos para los casos pequeño, mediano y grande, respectivamente.

Para calcular los beneficios de eficiencia, se compararán las horas hombre. Para lo cual, para introducir los datos a la IA se considerará un tiempo de 0.1 HH. A continuación se presenta un gráfico que muestra cuándo sería conveniente aplicar la IA.

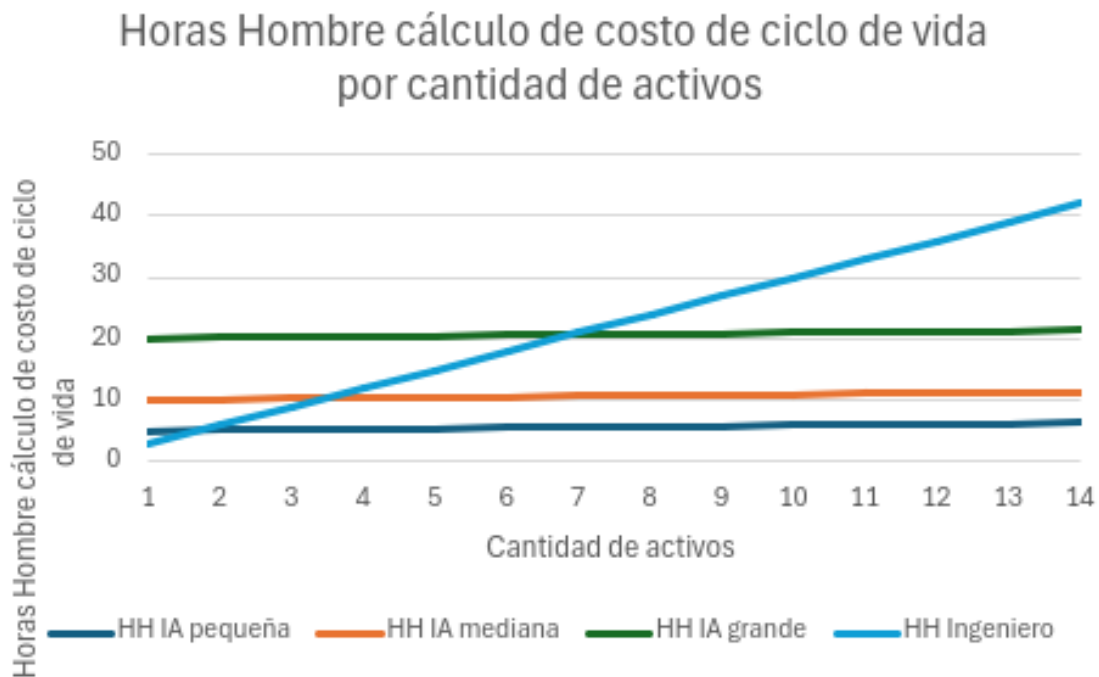


Figura 24: Horas Hombre calculo de costo ciclo de vida por cantidad de activos. Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en el gráfico de la figura 24, la eficiencia de la IA, tiene un mejor desempeño que las HH de un ingeniero.

En conclusión, se recomienda la aplicación de BIM aumentado con IA.

3.8.1.7 Aporte real de la IA a la función

BIM lograría cumplir con la función de la etapa 8 casi en su totalidad, esto siendo muy provechoso para el área de mantenimiento en la aplicación del MGAM de ocho etapas.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un estudio acerca de las herramientas de inteligencia artificial que puedan ser integradas a un modelo de gestión de activos y mantenimiento de ocho etapas de manera beneficiosa, las cuales son:

- ChatGPT para entregar lineamientos generales de la misión, visión y valores organizacionales en la primera etapa del MGAM Análisis de la Estrategia Empresarial e Identificación de Prioridades de Mantenimiento.
- Análisis de componentes principales aumentado con IA para evaluar KPIs actuales y establecer KPIs objetivos en la segunda etapa del MGAM Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento. .
- Aprendizaje de transferencia para optimizar el uso de recursos materiales en el manejo del inventario de repuestos en la etapa 6 del MGAM programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos .
- Blockchain para sistematizar la recolección de información en la etapa 7 del MGAM evaluación y control de la ejecución del mantenimiento.
- Modelado de información de construcción aumentado con IA para calcular los costos globales de los activos renovados en la etapa 8 del MGAM análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de equipos .

En base a todas estas herramientas estudiadas y analizadas, las ventajas y desventajas de su aplicación al incorporarlas al funcionamiento de un MGAM de ocho etapas ya descrito se concluye que su implementación y posterior utilización conlleva mejoras sustanciales en el funcionamiento del MGAM y, a su vez, importantes economías en la gestión del mismo. Cabe resaltar que, una vez puesto en marcha el MGAM de ocho etapas complementado con las herramientas IA, y con su uso cotidiano, los costos iniciales en horas-hombre se verán disminuidos al estar ingresadas las mayores cantidades de datos. Pasada esta etapa de implementación, los costos horas-hombre tenderán a disminuir significativamente y solo se reflejarán cuando se ingresen nuevos datos. También cabe resaltar que las herramientas IA están en constante desarrollo y también existe la posibilidad del surgimiento de nuevas herramientas IA que también pudieran ser utilizadas para los efectos de esta memoria.

Etapa del MGAM	Herramienta IA	Descripción función
Etapa 1	ChatGPT	Ayuda a redactar la misión, vision y los valores organizacionales de la empresa.
Etapa 2	Principal Component Analysis	Determina que KPIs son independientes y luego los predice.
Etapa 3 y 4	Big Data Knowledge Engineering	Se conectan sensores con IIoT y luego se saca conocimiento de los datos.
Etapa 5	Ant Colony Optimization	Imitando el comportamiento de las hormigas determina el nivel de aprovisionamiento optimo de los repuestos.
Etapa 6	Transfer Learning	Automatiza el acceso a repuestos con menos datos de entrenamiento que aplicaciones similares.
Etapa 7	Blockchain	Genera bases de datos inmutables sobre la ejecución del mantenimiento.
Etapa 8	Building Information Modeling	Determina el costo global de los activos renovados a partir de dibujos en CAD.

Table 6: Tabla resumen. Fuente: Elaboración propia

REFERENCIAS

- [15,] Blockchain cost analysis: Calculating expenses for your next blockchain implementation. [://webisoft.com/articles/blockchain-cost/](https://webisoft.com/articles/blockchain-cost/). Accessed: 2025-02-26.
- [14,] How much does it cost to develop an ai solution? pricing and roi explained. [://www.coherentsolutions.com/insights/ai-development-cost-estimation-pricing-structure-roi](https://www.coherentsolutions.com/insights/ai-development-cost-estimation-pricing-structure-roi). Accessed: 2025-01-20.
- [Abdulrahman et al., 2023] Abdulrahman, Y., Arnautović, E., Parezanović, V., and Svetinovic, D. (2023). Ai and blockchain synergy in aerospace engineering: An impact survey on operational efficiency and technological challenges. *IEEE Access*, 11:87790–87804.
- [Allen, 2020] Allen, G. (2020). Understanding ai technology. *Joint Artificial Intelligence Center (JAIC) The Pentagon United States*, 2(1):24–32.
- [Lee et al., 2023] Lee, C.-M., Jang, H.-J., and Jung, B.-G. (2023). Development of an automated spare-part management device for ship controlled by raspberry-pi microcomputer based on image-progressing transfer-learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5).
- [Mahat et al., 2023] Mahat, D., Niranjana, K., Naidu, C. S. K. V. R., Babu, S. B. G. T., Kumar, M., and L, N. (2023). Ai-driven optimization of supply chain and logistics in mechanical engineering. 10:1611–1616.
- [Mattioli et al., 2020] Mattioli, J., Perico, P., and Robic, P.-O. (2020). Artificial intelligence based asset management. pages 151–156.
- [Viveros et al., 2013] Viveros, P., Stegmaier, R. A., Kristjanpoller, F., Barbera, L., and Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21:125 – 138.
- [Xu et al., 2021] Xu, N., Song, Y., Guo, Z., Nie, J., Sheri, X., and Han, N. (2021). A cost managing scheme for power transmission and transformation using bim. pages 4–7.
- [Yang et al., 2022] Yang, J., Xiang, F., Li, R., Zhang, L., Yang, X., Jiang, S., Zhang, H., Wang, D., and Liu, X. (2022). Intelligent bridge management via big data knowledge engineering. *Automation in Construction*, 135:104118.

