



Metodología adaptativa para optimizar el mantenimiento basado en módulos (MBM) en sistemas de transporte vertical.

Proyecto de investigación

Miguel Orlando Fonseca Meneses
CC 1096234841
Angie Alexandra Calderón Holguín
CC 1007101531

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico
Bucaramanga (16-06-2026)



Metodología adaptativa para optimizar el mantenimiento basado en módulos (MBM) en sistemas de transporte vertical.

Proyecto de investigación

Miguel Orlando Fonseca Meneses
CC 1096234841
Angie Alexandra Calderón Holguín
CC 1007101531

**Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogo en Operación y Mantenimiento Electromecánico**

DIRECTOR

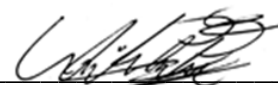
Arly Darío Rincón Quintero Dr. Sc.

Grupo de Investigación en Diseño y Materiales - DIMAT

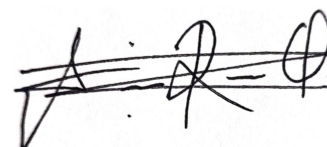
UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico
Bucaramanga (16-06-2026)

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por las
Unidades Tecnológicas de Santander para optar al título de
Tecnólogo en Operación y Mantenimiento Electromecánico
según acta del comité de trabajo de grado número 16 del 22
junio de 2026 Evaluador: Wilmar Leonardo Rondón Romero



Firma del Evaluador
Wilmar Leonardo Rondón Romero



Firma del Director
Arly Darío Rincón Quintero

TABLA DE CONTENIDO

<u>RESUMEN EJECUTIVO.....</u>	<u>8</u>
<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>9</u>
<u>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</u>	<u>12</u>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	15
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4 ESTADO DEL ARTE.....	16
<u>2 MARCO REFERENCIAL</u>	<u>20</u>
2.1 MARCO HISTÓRICO	20
2.2 MARCO CONCEPTUAL	21
MBM (MANTENIMIENTO BASADO EN MÓDULOS):	21
MTBF (TIEMPO MEDIO ENTRE FALLOS):	22
LCC (COSTO DEL CICLO DE VIDA):	22
MDP (PROCESOS DE DECISIÓN DE MARKOV):	22
RBF (REDES DE FUNCIÓN DE BASE RADIAL):	23
DRL (APRENDIZAJE POR REFUERZO PROFUNDO):	23
GEMELOS DIGITALES (DT):	23
SISTEMAS CIBERFÍSICOS (CPS):	24
2.3 MARCO TEÓRICO	24
2.4 MARCO DE COMPONENTES (TECNOLOGÍAS).....	25
2.5 MARCO AMBIENTAL	27
2.6 MARCO LEGAL Y NORMATIVO.....	29
<u>3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....</u>	<u>31</u>
3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	31
TIPO DE INVESTIGACIÓN	31
ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	31
METODOLOGÍA	32
PROCEDIMIENTO O FASES DE INVESTIGACIÓN	32

<u>4</u>	<u>DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO</u>	<u>34</u>
4.1	CONCEPTOS BÁSICOS	34
4.1.1	SUBSISTEMAS PRINCIPALES	34
4.1.2	IMPORTANCIA DE LA SEGURIDAD	34
	SISTEMAS DE MANTENIMIENTO	35
4.1	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA APLICADA	36
4.2	ETAPAS DE DESARROLLO	38
	DISEÑO DE HARDWARE	38
	DISEÑO DE MECANISMOS	38
	DISEÑO DE ENTORNOS	39
	DISEÑO DE SOFTWARE	39
	IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS	39
4.3	RESULTADOS ESPERADOS	40
	CONFIABILIDAD OPERACIONAL	40
	OPTIMIZACIÓN DE COSTOS	40
	SEGURIDAD Y DESEMPEÑO	41
	DISCUSIÓN PRELIMINAR	43
<u>5</u>	<u>RESULTADOS</u>	<u>45</u>
5.1	DOCUMENTACIÓN DE PRUEBAS SIMULADAS	45
5.2	TABULACIÓN DE RESULTADOS	46
5.3	GRAFICA DE RESULTADOS	46
5.4	ANÁLISIS CUANTITATIVO	49
5.5	CONFORMIDAD CON LOS OBJETIVOS	49
<u>6</u>	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>50</u>
<u>7</u>	<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>52</u>
7.1	TRABAJOS FUTUROS Y REFINAMIENTO DEL MODELO	52
7.2	APROPIACIÓN DEL CONOCIMIENTO Y CAPACITACIÓN TÉCNICA	53
7.3	INFRAESTRUCTURA Y ADECUACIÓN TECNOLÓGICA	53
7.4	GESTIÓN DE ACTIVOS Y NORMATIVA	54
<u>8</u>	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>56</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma del proceso de gestión de mantenimiento adaptativo propuesto. ...	42
Figura 2. Etapas del proceso de la estrategia de mantenimiento adaptativo.....	45
Figura 3. Distribución de falla por subsistema.....	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Avances recientes en Inteligencia Artificial y Modelos de decisión aplicados al Mantenimiento (2024-2025).....	21
Tabla 2. Marco legal y normativo aplicable al mantenimiento de sistemas de transporte vertical.....	29
Tabla 3. Análisis comparativo de las estrategias de mantenimiento MBM fijo y MBM adaptativo en sistemas de transporte vertical.....	35
Tabla 4. Indicador de cada metodología y su fuente.....	42
Tabla 5. Comparativo de indicadores de desempeño entre mantenimiento MBM fijo y CBM adaptativo según escenarios de simulación.....	46
Tabla 6. Comparativa de la frecuencia anual de fallas por subsistema entre el mantenimiento MBM fijo y el CBM adaptativo.....	46
Tabla 7. Comparativa de costos operativos y de mantenimiento: enfoque MBM fijo frente al modelo CBM adaptativo.....	47
Tabla 8. Costo de mantenimiento.....	48

RESUMEN EJECUTIVO

Se realiza un análisis de los sistemas de transporte vertical, donde se identifica que la aplicación de Mantenimiento Basado en Módulos (MBM) con intervalos fijos ha demostrado ser ineficiente ya que eleva la tasa de fallas y los costos operativos donde la identificación de componentes con desgaste nada fácil de percibir donde pueden escalar niveles críticos y el incremento de costos operativos. En consecuencia, esta problemática compromete las necesidades de asegurar la continuidad del servicio y la seguridad de los usuarios.

Se propone una metodología adaptativa para optimizar el mantenimiento basado en módulos (MBM), fundamentada en una estructura jerárquica de sistema, subsistemas de tracción, control y puertas, para facilitar intervenciones precisas por condición. La metodología ajusta los intervalos de mantenimiento según el estado del sistema, se encarga de modelar comportamientos complejos y detectar anomalías antes de que escalen estos ajustes ocurren cuando aparece una falla correctiva, con el fin de reducir los costos de los procesos de validación en especialmente en los entornos críticos.

Se proyecta las fallas mensuales deberían disminuir y la disminución de averías recurrentes en bloques de intervención de los sistemas críticos, como los operadores de puertas, genera una mejora sustancial en el Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF), al transformar el mantenimiento de un enfoque reactivo a uno proactivo y preciso. Desde la perspectiva económica, permite reducir los gastos operativos y de capital. Asimismo, favorece la productividad mejorando el desempeño global del sistema, resiliente y alineada con los objetivos estratégicos de la organización.

PALABRAS CLAVE. Mantenimiento basado en módulos (MBM); transporte vertical; mantenimiento adaptativo; redes neuronales RBF; confiabilidad operativa.

INTRODUCCIÓN

La gestión de activos industriales ha tenido un desarrollo considerable en respuesta al deseo de equilibrar la disponibilidad operativa de los sistemas de la instalación y los requerimientos de seguridad y fiabilidad demandados por los usuarios. En sus primeras etapas, dominó la filosofía del mantenimiento correctivo, el cual recurría a la ejecución de intervenciones cuando una detección de fallos ocurría por que el sistema fallaba. Este tipo de intervención se caracterizaba por una drástica reducción del número de trabajos de toda índole ejecutados, pero elevaba los costes por la indisponibilidad de la instalación, así como afectaba a la continuidad del servicio. Posteriormente, se desarrolló el mantenimiento preventivo de intervalos fijos, lo que finalmente supuso un mejoramiento de la fiabilidad de los activos. La falta de flexibilidad de los calendarios de intervención generaba actividades de sobre mantenimiento, así como una incapacidad para identificar de forma ágil riesgos operativos que se evolutivamente rápidos.

En lo argumentado de la Industria 4.0, la incorporación de Sistemas Ciberfísicos (CPS) y Gemelos Digitales (DT) está revolucionando los conceptos y procesos de monitoreo/gestión del mantenimiento alineados con el mantenimiento predictivo. Dichas tecnologías permiten una integración continua del sistema físico y su representación digital al tiempo que facilitan la adquisición, procesamiento y análisis en tiempo real de datos operativos (Vidyalakshmi et al., 2025). contribuyendo a la simulación de eventos potenciales que pueden suceder y a la evaluación de planes de actuación sin que ello implique desestabilizar el funcionamiento del sistema, permitiendo así ofrecer soluciones para prevenir problemas y permitir el tránsito hacia métodos de mantenimiento fundamentados en el estado real del sistema, entre ellos el Mantenimiento Basado en Condición y el mantenimiento adaptativo. Dado lo mencionado por Li et al. (2025), esas estrategias

permiten realizar decisiones para el mantenimiento que responden a la evolución real de la degradación de los componentes, aumentando así la capacidad de reacción frente a escenarios operativos virtuales.

Sin embargo, en muchos modelos de confiabilidad tradicionales siguen siendo simples. No muestra claramente cómo los diferentes componentes de un sistema interactúan entre sí. Esto incluye las relaciones estructurales, las probabilidades y los factores económicos que existen entre las partes del sistema. Esta limitación hace descender la exactitud de los procesos de diagnóstico y no permite identificar las fallas, ya que la identificación de fallas en niveles concretos del sistema es difícil. Para dar solución a esta problemática, la presente investigación sugiere la implementación del Mantenimiento Basado en Módulos (MBM) como mecanismo de gestión para los sistemas de transporte vertical. El MBM sugiere una estructura organizada para el sistema. Esto significa que se puede dividir el sistema en partes más pequeñas, como la tracción, el control y las puertas. De esta manera, es más fácil evaluar el estado de cada parte por separado. Según Gámiz et al. (2024), esta estructura es útil porque se permite diagnosticar problemas y optimizar la planificación de las intervenciones de mantenimiento. Como resultado, se beneficia la reducción del Costo del Ciclo de Vida (LCC) y el incremento del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), indicadores fundamentales para la gestión eficiente de activos (El-Akruti et al., 2013).

Igualmente, la aplicación del MBM es muy útil en ciudades con mucha gente, donde los sistemas de transporte vertical son fundamentales para que las personas se muevan. Si se detectan problemas pronto y se optimizan las intervenciones, se puede mejorar la disponibilidad de los equipos y hacer que sea más seguro para los usuarios. Además, si los elementos pueden ser eliminados sin necesidad y en la mejora de la eficiencia, el daño que causa el consumo de recursos y del medio ambiente que causa el sistema, se puede hacer menos (El-Akruti et al., 2013; Gámiz

et al., 2024) Por lo tanto, la propuesta no sólo apela a cuestiones técnicas como son la fiabilidad y el mantenimiento, sino que también tiene en cuenta la sostenibilidad y la gestión eficiente de los recursos (El-Akruti et al., 2013).

Para poder dar respuesta a la necesidad de una planificación que sea dinámica y basada en datos, la investigación incorpora un conjunto de herramientas de carácter computacional orientadas a su análisis predictivo y la toma de decisiones (Li et al., 2025; Vidyalakshmi et al., 2025). Por otro lado, las Redes de Función de Base Radial (RBF) se utilizan como estimadores dinámicos del estado de salud de los módulos, aprovechando su capacidad para representar relaciones de tipo no lineal, así como en el procesamiento de las incertidumbres propias de los procesos de degradación (Zhang et al., 2025). Desde otro punto de vista, se utilizan Procesos de Decisión de Markov (MDP) de horizonte finito, para modelar su evolución probabilística y para determinar automáticamente políticas que sean óptimas (Li et al., 2025). Finalmente, se incorpora el Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL). Esta tecnología actúa como un agente de decisión autónomo. Permite ajustar la frecuencia de las intervenciones en función de los cambios en las condiciones operativas. Esto se basa en los hallazgos de Gámiz et al. (2024) y Li et al. (2025)

La integración de estos métodos ofrece una estructura de mantenimiento adaptable. Esta estructura puede garantizar la disponibilidad, la confiabilidad y los costos de operación al mismo tiempo. Los aspectos metodológicos y la implementación técnica de esta propuesta se explican en detalle en la Sección 3.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de transporte vertical, al estar conformados por múltiples componentes interdependientes, ya que esta estructura facilita la identificación de fallas de manera más eficiente. En este caso, el enfoque Mantenimiento Basado en Módulos (MBM) con periodicidades fijas ignora en gran parte el desgaste de los componentes es un proceso demasiado dinámico ya que funcionan con condiciones operativas variables. La literatura destaca que las dependencias económicas, estructurales entre los componentes hace que sea más fácil de intervenir por su estructura jerárquica (Gámiz et al., 2024; Li et al., 2025). Esta aproximación permite que las decisiones se fundamentan de la información obtenida mediante sensores en los diferentes niveles jerárquicos, proporcionando una visión en tiempo real. De esta manera se evita el proceso de inspección, que facilita para una mayor trazabilidad, comprensión del comportamiento de los activos (Gámiz et al., 2024).

Estudios recientes demuestran que calendarios preventivos rígidos en sistemas con varios componentes elevan costos o fallas por no adaptarse adecuadamente a los riesgos dinámicos (Ilalokhoin et al., 2023). Por ello, se recomiendan la transición hacia políticas que ajusten acciones por conjuntos de componentes, optimizando el rendimiento global mediante el uso de sistemas ciberfísicos (CPS) que se ayuda con elementos computacionales y físicos para el control del sistema en tiempo real (Gámiz et al., 2024; Vidyalakshmi et al., 2025). Y esto se complementa con los gemelos digitales (DT), que actúa como replicas virtuales para facilitar la toma de decisiones mediante simulaciones y análisis predictivos sin interrumpir los procesos de los ascensores (Vidyalakshmi et al., 2025).

La necesidad de una metodología adaptativa se fundamenta en marcos de decisión avanzados como los Procesos de Decisión de Markov (MDP), resuelve para obtener estrategias de mantenimiento optimas al maximizar la recompensa en términos de confiabilidad y costo (Li et al., 2025). Esta estructura técnica se potencia sin la integración de redes neuronales de Función de Base Radial (RBF), las cuales están diseñadas para la aproximación para estimar dinámicamente el sistema y mitigar los problemas técnicos como las oscilaciones en el control (Zhang et al., 2025). Finalmente, el uso de estos modelos con algoritmos de Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL) garantiza que los ajustes sean precisos proactivos y autónomos, optimizando el desempeño frente a cualquier eventualidad.

De acuerdo con lo planteado surge la pregunta de investigación:

¿Cómo estructurar una metodología adaptativa de mantenimiento basado en módulos (MBM) que, integrando diagnóstico por módulos y ajuste dinámico de periodicidades, mejore la confiabilidad y reduzca la recurrencia de fallas en sistemas de transporte vertical?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La optimización del mantenimiento en sistemas de transporte vertical constituye uno de los desafíos más relevantes en la gestión moderna de infraestructuras. Los ascensores, lejos de ser mecanismos simples, funcionan como ecosistemas tecnológicos donde subsistemas de tracción, control y puertas interactúan de manera constante. Basta con que uno de estos componentes falle para que el rendimiento global se vea comprometido. Sin embargo, durante años, gran parte de las estrategias de mantenimiento se apoyaron en el Mantenimiento Basado en Módulos (MBM) con intervalos de intervención predefinidos. La intención era garantizar la confiabilidad; el resultado, en muchos casos, fue un conflicto operativo:

reemplazar componentes que aún conservaban vida útil mientras otros progresaban silenciosamente hacia el deterioro sin ser detectados a tiempo (Li et al., 2025).

El problema radica en que los intervalos fijos ignoran una realidad fundamental: no todos los ascensores envejecen al mismo ritmo. Un equipo instalado en un edificio corporativo con tráfico constante experimenta condiciones muy distintas a las de uno ubicado en una residencia de baja ocupación. Tratar ambos casos bajo el mismo calendario de mantenimiento equivale a prescribir el mismo tratamiento a pacientes con diagnósticos diferentes, ignorando las particularidades y necesidades de cada caso. La consecuencia suele reflejarse en mayores tasas de fallas, costos operativos elevados y una utilización ineficiente de los recursos disponibles.

Ante esta limitación, las tecnologías emergentes han impulsado una transformación profunda en la forma de tomar decisiones de mantenimiento. Los enfoques jerárquicos permiten evaluar el estado real de los equipos y priorizar intervenciones donde verdaderamente son necesarias. En este contexto, los Procesos de Decisión de Markov (MDP) y las redes neuronales de Función de Base Radial (RBF) ofrecen herramientas capaces de modelar tanto fallas repentinas como procesos graduales de degradación. Sobre esta base, los algoritmos de Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL) actúan como sistemas de aprendizaje continuo que perfeccionan sus decisiones a medida que acumulan experiencia, seleccionando políticas de mantenimiento cada vez más eficientes y adaptadas a las condiciones operativas reales (Zhang et al., 2025).

La incorporación de Gemelos Digitales (DT) integrados en Sistemas Ciberfísicos (CPS) amplía aún más estas capacidades. Estas réplicas virtuales permiten observar el comportamiento del sistema en tiempo real, simular escenarios futuros y evaluar estrategias de intervención antes de ejecutarlas físicamente. Resulta llamativo que muchas averías puedan detectarse primero en una

representación digital del equipo, como si el sistema proyectara una sombra anticipada de sus problemas futuros. Gracias a esta capacidad predictiva, las organizaciones pueden actuar antes de que una anomalía se convierta en una interrupción del servicio, fortaleciendo así la confiabilidad operativa (Vidyalakshmi et al., 2025).

Desde el punto de vista económico, los beneficios son igualmente significativos. Las políticas adaptativas contribuyen a reducir el Costo del Ciclo de Vida (LCC) al evitar dos extremos contraproducentes: el sobre mantenimiento, que consume recursos sin aportar valor proporcional, y las reparaciones tardías, que suelen traducirse en costos elevados y riesgos operativos considerables (El-Akruti et al., 2013). Entre ambos extremos se encuentra una gestión más inteligente, capaz de equilibrar eficiencia y seguridad.

La dimensión social tampoco puede ignorarse. En edificios residenciales, hospitales, centros comerciales o complejos corporativos, los ascensores constituyen una infraestructura esencial para la movilidad cotidiana. Maximizar el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) no solo mejora indicadores técnicos; también reduce interrupciones inesperadas y fortalece la confianza de los usuarios. En una sociedad cada vez más dependiente de sistemas automatizados, la resiliencia operativa se convierte en un requisito tan importante como la propia funcionalidad.

1.3 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una metodología adaptativa para el MBM en sistemas de transporte vertical que, mediante análisis de fallas por módulos y ajuste dinámico de periodicidades, optimice la confiabilidad operativa y el costo de mantenimiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el comportamiento técnico modular y los patrones de degradación funcional en sistemas de transporte vertical, mediante la arquitectura jerárquica Sistema–Módulo–Componente del algoritmo MoMA, para identificar la criticidad operativa y los indicadores base de confiabilidad.
- Establecer un modelo matemático para la estimación de estados de salud técnica mediante redes neuronales de Función de Base Radial (RBF) y Procesos de Decisión de Markov (MDP), con el propósito de apoyar la toma de decisiones bajo escenarios de incertidumbre operativa.
- Desarrollar una política de mantenimiento adaptativo y control tolerante a fallos fundamentada en Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL), para la activación adaptativa de intervenciones en los módulos de tracción, control y puertas, orientada a la optimización de la disponibilidad y confiabilidad operativa.
- Validar el desempeño técnico y la sostenibilidad financiera de la metodología adaptativa frente a políticas de mantenimiento preventivo con un esquema de mantenimiento tipo calendario, mediante simulaciones Monte Carlo orientadas a contrastar comportamiento relativas del MTBF, disponibilidad operacional y costo del ciclo de vida (LCC).

1.4 ESTADO DEL ARTE

La gestión del mantenimiento en sistemas multicomponente ha evolucionado desde enfoques estáticos hacia estrategias dinámicas que consideran la interdependencia estructural, estocástica y económica entre sus elementos. De acuerdo con (Gámiz et al., 2024), los sistemas industriales de arquitectura modular, entre ellos los sistemas de transporte vertical, requieren esquemas de decisión jerárquicos

sustentados en el estado de salud del activo. Dicho estado se evalúa en distintos niveles, incluyendo sistema, módulos y componentes. Para este propósito, se emplea el algoritmo Modular Matrix-Analytic Method (MoMA), el cual permite caracterizar detalladamente las condiciones operativas y planificar intervenciones de manera precisa. Como resultado, se mejora la visibilidad del comportamiento interno del sistema durante las inspecciones y se favorece una gestión de mantenimiento basada en condición. Bajo esta premisa, surge la necesidad de incorporar herramientas que representen la evolución temporal de las fallas (Li et al., 2025).

En el ámbito de la inteligencia artificial aplicada al mantenimiento, se han desarrollado modelos orientados a la gestión de sistemas con mecanismos de degradación complejos. (Li et al., 2025) proponen un marco que integra Redes Bayesianas Dinámicas (DBN) con el Modelo de Riesgos Proporcionales (PHM), permitiendo representar simultáneamente fallas discretas y procesos continuos de degradación. Este enfoque resulta particularmente relevante en sistemas de transporte vertical, donde los componentes presentan tasas de desgaste diferenciadas. Asimismo, la toma de decisiones se optimiza mediante Procesos de Decisión de Markov (MDP) de horizonte finito, los cuales facilitan la selección de políticas de mantenimiento en función de la evolución del sistema. La evidencia reportada indica que esta integración incrementa la disponibilidad operativa y reduce los costos totales de mantenimiento en aproximadamente un 10 % respecto a modelos que asumen independencia entre componentes. En consecuencia, se fortalece la capacidad de respuesta ante escenarios de degradación heterogénea (Li et al., 2025).

De igual manera, la incorporación de Gemelos Digitales (DT) y Sistemas Ciberfísicos (CPS) ha ampliado las capacidades de monitoreo y simulación en sistemas de transporte vertical (Vidyalakshmi et al., 2025). Estas tecnologías

permiten construir representaciones virtuales sincronizadas con los datos provenientes de sensores físicos, facilitando el análisis continuo de las condiciones operativas. A partir de esta integración, se identifican anomalías de manera temprana y se evalúan diferentes estrategias de intervención antes de su implementación en el entorno real. Además, se optimizan los calendarios de mantenimiento mediante la actualización permanente de la información operacional. Esta capacidad resulta especialmente relevante en contextos donde la variabilidad de uso limita la efectividad de los planes preventivos convencionales. Debido a esto, los modelos predictivos adquieren un papel central dentro de las estrategias modernas de mantenimiento (Vidyalakshmi et al., 2025).

En el ámbito de la inteligencia artificial aplicada, Wang et al. (2026) proponen un marco de toma de decisiones jerárquica para sistemas modulares. Este estudio sugiere que, en lugar de inspeccionar todos los componentes, se deben priorizar los módulos con mayor riesgo dinámico mediante algoritmos de aprendizaje por refuerzo profundo (DRL). Este enfoque es particularmente relevante para ascensores, donde subsistemas críticos como el control y las seguridades presentan tasas de degradación distintas bajo condiciones de uso intensivo.

Finalmente, desde la perspectiva de la Gestión de Activos establecida por la norma ISO 55000, el análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCC) constituye un criterio fundamental para equilibrar el desempeño técnico con la sostenibilidad económica (El-Akruti et al., 2013). La literatura especializada indica que las políticas de mantenimiento deben incorporar mecanismos de aprendizaje derivados de las intervenciones correctivas y de la evolución de las condiciones operativas (Martón et al., 2023). Dichos mecanismos permiten ajustar dinámicamente las frecuencias de intervención en módulos funcionalmente relacionados, mejorando la confiabilidad y la disponibilidad del sistema (Gámiz et al., 2024). Por consiguiente, la integración de modelos predictivos, herramientas de simulación y criterios

económicos proporciona una base sólida para la toma de decisiones en sistemas de transporte vertical de alta exigencia operativa (El-Akruti et al., 2013; Vidyalakshmi et al., 2025).

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco histórico

La gestión de activos industriales ha evolucionado desde un paradigma impulsado por disponibilidad–seguridad (no se puede poner en riesgo la seguridad en el proceso de mantener la disponibilidad) (Gámiz et al., 2024; Li et al., 2025). La industria se construyó al principio en torno al mantenimiento correctivo, ya que los equipos solo se intervenían después de que hubiera ocurrido una falla. A esto le siguió el mantenimiento preventivo por calendario fijo, que mejoró la confiabilidad, pero perjudicó la eficiencia de costos, ya que condujo a un exceso de mantenimiento o a fallas originadas en riesgos dinámicos que se pasaron por alto. El tercero es el mantenimiento basado en condición (CBM), que añadió sensores para detectar el desgaste real y realizar intervenciones de manera proactiva. Hoy, el sector se encuentra en una fase de mantenimiento adaptativo que mejora la capacidad de realizar ajustes autónomos con IA y Gemelos Digitales para adaptarse a eventos dinámicos de manera rápida y resiliente (Li et al., 2025; Vidyalakshmi et al., 2025; Zhang et al., 2025).

Tabla 1. Avances recientes en Inteligencia Artificial y Modelos de decisión aplicados al Mantenimiento (2024-2025)

Año	Autor	Técnica / Algoritmo	Hallazgo Principal
2024	Gámiz et al.	Algoritmo MoMA	Estructura de decisión jerárquica que evita que el sistema se comporte como una "caja negra".
2025	Li et al.	DBN-PHM + MDP	Marco de decisión para sistemas multicomponente que integra fallas discretas y por degradación.
2025	Zhang et al.	MPSO-RBF	Uso de redes RBF para estimar dinámicamente incertidumbres y mitigar oscilaciones en el control.
2025	Vidyalakshmi et al.	CPS-DT Integration	Sinergia entre réplicas virtuales y sistemas físicos para optimización en tiempo real en la Industria 4.0

Nota: Elaboración propia a partir de las fuentes analizadas.

2.2 Marco Conceptual

MBM (Mantenimiento Basado en Módulos):

Es una estrategia de gestión del mantenimiento que estructura el sistema de transporte vertical en subsistemas funcionales independientes, tales como tracción, control y puertas. Esta segmentación jerárquica permite analizar el estado de cada módulo de manera individual, facilitando la identificación de fallas y la evaluación de su impacto sobre el desempeño global del sistema. Según Gámiz et al. (2024) este

enfoque resulta especialmente adecuado para sistemas de arquitectura modular, donde las decisiones de mantenimiento pueden fundamentarse en el estado de salud de cada nivel funcional.

MTBF (Tiempo Medio Entre Fallos):

Es el indicador principal de confiabilidad en este proyecto, utilizado como variable objetivo para validar que la transición de un mantenimiento reactivo a uno proactivo reduce la recurrencia de averías.

LCC (Costo del Ciclo de Vida):

Constituye la métrica financiera dominante que equilibra el rendimiento técnico con la sostenibilidad económica, permitiendo la optimización de las frecuencias de reemplazo para maximizar el retorno de inversión (El-Akruti et al., 2013).

MDP (Procesos de Decisión de Markov):

Es el marco matemático utilizado para modelar problemas de toma de decisiones secuenciales en entornos caracterizados por incertidumbre. Este enfoque permite representar la evolución de los estados de un sistema mediante probabilidades de transición y evaluar las consecuencias asociadas a diferentes acciones de intervención. Como señalan Li et al. (2025) los MDP proporcionan una estructura formal para seleccionar políticas de mantenimiento en función de la condición operativa y el comportamiento esperado del sistema.

RBF (Redes de Función de Base Radial):

Constituyen una técnica de inteligencia artificial utilizada para modelar relaciones no lineales y aproximar funciones complejas a partir de datos operativos. Su estructura permite procesar información proveniente de múltiples variables del sistema y generar estimaciones precisas sobre su condición de funcionamiento. Debido a esta capacidad, las RBF son ampliamente empleadas en aplicaciones de monitoreo, diagnóstico y predicción de fallas. (Zhang et al., 2025).

DRL (Aprendizaje por Refuerzo Profundo):

El módulo de decisión constituye el agente autónomo del sistema encargado de ajustar las periodicidades de mantenimiento en función de cambios en las condiciones operativas y eventos dinámicos. Su funcionamiento se basa en el análisis continuo de la información proveniente de los procesos de monitoreo y evaluación del estado de salud de los componentes. A partir de esta información, se determinan acciones de mantenimiento adaptativas orientadas a mitigar riesgos y optimizar el desempeño del sistema. En consecuencia, este módulo permite responder de manera eficiente a escenarios de incertidumbre y variabilidad operativa, fortaleciendo la capacidad de gestión del mantenimiento (Gámiz et al., 2024; Li et al., 2025; Zhang et al., 2025).

Gemelos Digitales (DT):

Son una representación virtual del sistema de transporte vertical sincronizada continuamente con los datos generados por el activo físico. Esta integración permite reproducir el comportamiento operativo del sistema en un entorno digital, incorporando información proveniente de sensores, registros históricos y variables

de funcionamiento. De esta manera, se obtiene una visión actualizada del estado del sistema y de su evolución a lo largo del tiempo.

Asimismo, los DT facilitan la ejecución de simulaciones y análisis predictivos sin afectar la operación normal del sistema de transporte vertical. Mediante la evaluación de distintos escenarios operativos, es posible estimar el impacto de fallas potenciales, analizar el comportamiento de los componentes y validar estrategias de mantenimiento antes de su implementación. En consecuencia, esta tecnología contribuye a mejorar la toma de decisiones, optimizar la planificación de intervenciones y reducir los riesgos asociados a la interrupción del servicio (Vidyalakshmi et al., 2025).

Sistemas Ciberfísicos (CPS):

Integran los procesos computacionales de control, monitoreo y comunicación con los componentes físicos del sistema de transporte vertical. Esta arquitectura permite el intercambio continuo de información entre el entorno físico y las plataformas digitales, facilitando la supervisión en tiempo real de las condiciones operativas del sistema. Como resultado, se mejora la capacidad de detección de eventos, el procesamiento de datos y la ejecución de acciones de control basadas en información actualizada (Vidyalakshmi et al., 2025).

2.3 Marco Teórico

Esta investigación se basa en la teoría de la arquitectura de sistemas jerárquicos, en la que la condición operativa de un sistema de transporte vertical no es una unidad indivisible, sino un estado funcional definido por las funcionalidades (y por ende también su desempeño) de sus módulos, mientras que la salud de estos módulos, a su vez, está determinada por el desempeño agregado de sus

componentes individuales (Gámiz et al., 2024). Esta estructura permite representar las relaciones entre los niveles de dependencia de un sistema respecto de otros subsistemas y componentes, que a su vez generan una evaluación de riesgos multidimensional del comportamiento operativo (Gámiz et al., 2024; Li et al., 2025).

En este sentido, la arquitectura modular es efectivamente la infraestructura habilitante clave para una gestión de mantenimiento de alto rendimiento. Este método permite realizar un diagnóstico espacial preciso (es decir, identificar anomalías en niveles específicos del sistema sin tener que evaluar todas las partes del activo) (Gámiz et al., 2024). La descomposición funcional ayuda a desacoplar el sistema en unidades independientes, lo que conduce a un aislamiento eficiente de defectos y a la focalización de las intervenciones. Un tipo de inspección tan detallado no solo acelera las inspecciones promovidas, sino que también agiliza la asignación de recursos para hacer un uso óptimo de ellos y reduce los costos a la actividad asociada a las paradas (Gámiz et al., 2024; Vidyalakshmi et al., 2025).

Así, la jerarquía aporta la base conceptual para estrategias de monitoreo predictivo que surgen de representaciones realistas de los mecanismos de falla. Con base en el conocimiento de cómo el deterioro de un elemento específico alterará la confiabilidad del módulo, por lo tanto, afectará indicador de la disponibilidad del servicio en el nivel del sistema, se pueden establecer algoritmos adaptativos de decisión para superar las limitaciones inherentes de la política preventiva convencional (Gámiz et al., 2024; Li et al., 2025).

2.4 Marco de Componentes (Tecnologías)

La implementación metodológica se sustenta en una arquitectura tecnológica distribuida, diseñada para gestionar de manera eficiente los distintos subsistemas que conforman el sistema de transporte vertical. Como señalan Gámiz et al. (2024)

la segmentación en módulos funcionales críticos, tales como tracción, control y puertas, permite estructurar las actividades de monitoreo, diagnóstico y mantenimiento de forma independiente. Esta organización favorece la especialización de los procedimientos técnicos asociados a cada módulo y facilita la localización de fallas dentro del sistema. En consecuencia, se optimiza la gestión de activos y se reducen los tiempos de indisponibilidad durante las intervenciones de mantenimiento.

En la capa física, se incorpora una infraestructura de sensores basada en el Internet de las Cosas (IoT), responsable de la adquisición continua de datos operativos de alta frecuencia. Esta red de sensores permite monitorear variables asociadas al desempeño, la condición y el comportamiento dinámico de los componentes del sistema. Asimismo, la información recopilada es transmitida a una arquitectura de control jerárquica para su procesamiento y análisis. Debido a esta integración, se dispone de una base de datos operativa que respalda los procesos de supervisión, diagnóstico y toma de decisiones en tiempo real.

Complementariamente, la interacción entre los elementos físicos y digitales da lugar a la implementación de un Sistema Ciberfísico (CPS), capaz de mantener una sincronización continua entre el estado real del sistema y sus modelos computacionales. De acuerdo con Vidyalakshmi et al. (2025), este tipo de arquitectura permite establecer bucles de retroalimentación en tiempo real, facilitando la detección temprana de anomalías y la adaptación dinámica de las estrategias de operación y mantenimiento. Esta capacidad fortalece la resiliencia del sistema frente a cambios en las condiciones operativas y mejora la calidad de la información utilizada para la toma de decisiones. Bajo esta premisa, el CPS constituye el núcleo de integración tecnológica de la solución propuesta.

Por otra parte, el procesamiento inteligente de la información se apoya en una Red de Función de Base Radial (RBF), utilizada como estimador dinámico del estado de salud del sistema. Según (Watson et al., 2023), las RBF poseen capacidades de aproximación no lineal que permiten interpretar patrones complejos presentes en los datos operativos. Mediante el análisis continuo de las variables monitoreadas, la red identifica comportamientos asociados a procesos de degradación y condiciones anómalas de funcionamiento. Como resultado, se mejora la precisión de las estimaciones del estado operativo y se fortalece la capacidad predictiva del sistema de mantenimiento.

Finalmente, la integración de la arquitectura modular, la infraestructura IoT, los CPS y las RBF configura una plataforma tecnológica orientada al mantenimiento adaptativo. La combinación de estas tecnologías permite mejorar la trazabilidad de fallas, optimizar los procesos de diagnóstico y reducir los tiempos requeridos para la identificación de eventos críticos. Asimismo, se favorece una gestión más eficiente de los recursos de mantenimiento al disponer de información actualizada sobre la condición de cada módulo. Por consiguiente, el modularidad tecnológica se consolida como un elemento fundamental para garantizar la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad del sistema de transporte vertical.

2.5 Marco Ambiental

El mantenimiento adaptativo se posiciona como un pilar fundamental de la sostenibilidad industrial al optimizar el uso de recursos y extender la vida útil de los componentes mecánicos y electrónicos del sistema. A diferencia de los enfoques tradicionales basados en intervalos fijos de intervención, este paradigma fundamenta las decisiones de mantenimiento en la condición real de los componentes. Como resultado, se reducen las sustituciones prematuras y se

aprovecha de manera más eficiente la capacidad operativa de los sistemas. En consecuencia, se minimiza el consumo innecesario de materiales y recursos asociados a las actividades de mantenimiento se alinea con los principios de eficiencia en el uso de recursos y economía circular (Li et al., 2025; Vidyalakshmi et al., 2025).

Complementariamente, la integración de Gemelos Digitales (DT) permite gestionar de forma completa el ciclo de vida de los activos. Estas plataformas facilitan el monitoreo continuo de las condiciones operativas, la simulación de escenarios de degradación y la evaluación de estrategias de intervención antes de su implementación. Además, los DT proporcionan información relevante para la planificación de la etapa de fin de vida del activo (End-of-Life), favoreciendo procesos de desmantelamiento, reutilización y disposición final más controlados. En consecuencia, se reducen los riesgos asociados a la gestión inadecuada de residuos y a la contaminación ambiental derivada de componentes fuera de servicio (Vidyalakshmi et al., 2025).

De este modo, la integración de tecnologías avanzadas de monitoreo, análisis predictivo e inteligencia artificial fortalece la relación entre eficiencia técnica y sostenibilidad ambiental. La capacidad de anticipar fallas, optimizar intervenciones y maximizar la utilización de los componentes permite reducir el consumo de recursos, minimizar la generación de residuos y mejorar el desempeño energético del sistema. Por consiguiente, el mantenimiento adaptativo no solo contribuye a incrementar la confiabilidad y disponibilidad de los activos, sino que también promueve una gestión ambientalmente responsable en los sistemas de transporte vertical (Watson et al., 2023).

2.6 Marco Legal y Normativo

La gestión y operación de los sistemas de transporte vertical en Colombia se encuentran reguladas por un conjunto de disposiciones técnicas y legales orientadas a garantizar la seguridad de los usuarios, la confiabilidad de los equipos y la integridad de las instalaciones. Este marco normativo establece los requisitos mínimos para la inspección, mantenimiento y operación de los sistemas, definiendo procedimientos que permitan reducir los riesgos asociados a fallas operativas. En consecuencia, cualquier estrategia de mantenimiento implementada debe desarrollarse en conformidad con los lineamientos establecidos por la normativa vigente.

Tabla 2. Marco legal y normativo aplicable al mantenimiento de sistemas de transporte vertical.

Normativa / Ley	Ámbito y Objetivo	Funciones y Directrices	Impacto y Resultado
NTC 5926-1	Revisiones periódicas en ascensores electromecánicos e hidráulicos.	Criterios de evaluación, procedimientos de inspección y clasificación de defectos.	Define continuidad operativa o acciones correctivas; garantiza seguridad y funcionamiento.
NTC 4349	Actividades de mantenimiento preventivo en ascensores.	Estandariza inspección, ajuste y conservación de componentes críticos.	Preserva condiciones operativas, reduce fallas y apoya la planificación del mantenimiento.
Ley 1562 de 2012	Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) en mantenimiento.	Lineamientos para identificar, evaluar y controlar riesgos laborales.	Garantiza seguridad para el personal técnico y minimiza accidentes y enfermedades laborales.
ISO 55000	Gestión de activos físicos (a nivel internacional).	Toma de decisiones basada en desempeño técnico, riesgo y Costo del Ciclo de Vida (LCC).	Alinea estrategias con objetivos y sostenibilidad; maximiza el valor del activo durante su ciclo de vida.

Fuente: Elaboración propia

En conclusión, la implementación de estrategias de mantenimiento adaptativo debe garantizar el cumplimiento simultáneo de los requisitos técnicos, legales y de seguridad establecidos por la normativa aplicable. La utilización de herramientas de monitoreo, análisis predictivo y toma de decisiones basada en condición permite optimizar las frecuencias de intervención sin comprometer los estándares regulatorios exigidos. Asimismo, estas tecnologías fortalecen la trazabilidad de las actividades de mantenimiento mediante el registro sistemático de las condiciones operativas y de las acciones ejecutadas. Por consiguiente, el mantenimiento adaptativo constituye una alternativa compatible con los principios de seguridad, confiabilidad y cumplimiento normativo requeridos para la operación de sistemas de transporte vertical en Colombia.

3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Diseño de la investigación

La presente investigación se realiza bajo un enfoque orientado a la optimización de una metodología fija hacia una adaptativa en los mantenimientos de sistemas de transporte vertical, más específicamente en ascensores. Esto se logra mediante la implementación de estrategias de mantenimiento basadas en condición y en las características específicas de uso de los equipos.

Tipo de investigación

El proyecto corresponde a una investigación de tipo descriptiva y explicativa.

- Es descriptiva porque busca caracterizar el estado actual de las estrategias de mantenimiento utilizadas en los ascensores, identificando los componentes principales, sus subcomponentes, los modos de falla y las distintas características específicas de operación que influyen en su desempeño.
- Presenta un alcance explicativo, ya que se analiza la relación entre las condiciones de operación, el comportamiento de los componentes y la ocurrencia de las fallas.

Este planteamiento se alinea con metodologías aplicadas en otros sectores críticos, como el ferroviario, donde se han desarrollado modelos para evaluar la resiliencia y explicar la relación entre condiciones operativas y confiabilidad (Ilalokhoin et al., 2023).

Enfoque de investigación

El enfoque será mixto, con predominio cualitativo y apoyo cuantitativo. Este esquema se encuentra en línea con investigaciones recientes en otros sistemas, como el control tolerante a fallos en UAVs, en donde se combina modelado

conceptual con una validación cuantitativa para garantizar mayor seguridad y desempeño. (Zhang et al., 2025)

Metodología

- Análisis de modos de falla: Identificación de fallas potenciales y sus efectos sobre la disponibilidad, seguridad y desempeño del sistema. Este enfoque se complementa con algoritmos como MoMA, que optimizan la planificación de mantenimiento considerando costo del ciclo de vida y confiabilidad (Gámiz et al., 2024)
- Modelamiento conceptual: Estructuración de una metodología adaptativa basada en módulos, donde la información obtenida de las novedades en el sistema permita establecer criterios para una nueva planificación del mantenimiento. Aquí resulta pertinente la integración de gemelos digitales, que permiten representar virtualmente el sistema y simular escenarios de operación (Vidyalakshmi et al., 2025)
- Simulación o validación mediante escenarios: Evaluación de la metodología propuesta mediante escenarios simulados de posibles comportamientos del sistema. Este procedimiento se fundamenta en la literatura sobre sistemas ciberfísicos, que destacan la capacidad de los modelos predictivos para anticipar degradaciones y mejorar la toma de decisiones (Vidyalakshmi et al., 2025).

Procedimiento o fases de investigación

- Fase 1: Revisión y fundamentación teórica. Recopilación y análisis de información científica relacionada con estrategias de mantenimiento, confiabilidad, mantenimiento basado en condición, gemelos digitales y sistemas ciberfísicos.

- Fase 2: Caracterización del sistema de ascensores. Identificación de los principales módulos funcionales del sistema de transporte vertical, considerando elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos.
- Fase 3: Identificación de variables y criterios de mantenimiento. Determinación de variables técnicas asociadas al estado del sistema y criterios para evaluar la condición de los componentes, considerando factores como degradación, historial de fallas, criticidad y comportamiento operativo.

4 DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1 Conceptos básicos

Los ascensores son sistemas de transporte vertical esenciales en edificaciones modernas, cuya función es garantizar accesibilidad, seguridad y eficiencia en el desplazamiento de personas y cargas. Su importancia radica en que constituyen equipos críticos, donde la confiabilidad y la seguridad operacional son prioritarias (NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5926-1, 2012).

4.1.1 Subsistemas principales

- **Mecánico:** cabina, guías, contrapeso, poleas y elementos de suspensión. Estos componentes son los más expuestos a desgaste físico y requieren estrategias de mantenimiento basadas en modos de falla para garantizar disponibilidad (Gámiz et al., 2024)
- **Eléctrico:** motor de tracción, cableado de potencia y sistemas de alimentación. La degradación eléctrica es una de las principales causas de indisponibilidad en sistemas críticos, como se evidencia en estudios de resiliencia ferroviaria (Ilalokhoin et al., 2023).
- **Electrónico:** controladores, sensores y tarjetas de mando. La confiabilidad de estos sistemas es comparable a la de UAVs, donde el control tolerante a fallos es indispensable para evitar interrupciones operativas (Zhang et al., 2025)

4.1.2 Importancia de la seguridad

- La seguridad en ascensores está regulada por normas internacionales como **EN 81 (Europa)**, **ASME A17.1 (EE. UU./Canadá)** y la **NTC 5926-1 (Colombia)**, que establecen requisitos de diseño, inspección y

mantenimiento. Estas normas obligan a implementar frenos de emergencia, alarmas, sistemas de comunicación bidireccional y planes de mantenimiento periódico para minimizar riesgos de atrapamiento o accidentes graves.

Sistemas de mantenimiento

- **Correctivo:** ejecutado tras una falla, con altos costos y riesgos de indisponibilidad.
- **Preventivo (MBM fijo):** basado en intervalos de tiempo o ciclos de uso. Este enfoque busca optimizar tiempos y costos, pero puede generar sobre-mantenimiento o sub-mantenimiento. El MBM organiza procedimientos en módulos jerárquicos, lo que facilita la capacitación de técnicos y la estandarización de tareas (El-Akruti et al., 2013)
- **Adaptativo/CBM:** utiliza monitoreo de condición y tecnologías como gemelos digitales para anticipar fallas y optimizar recursos. Los gemelos digitales permiten simular escenarios de operación y validar metodologías adaptativas, como se ha demostrado en sistemas ciberfísicos (Vidyalakshmi et al., 2025)

Tabla 3. Análisis comparativo de las estrategias de mantenimiento MBM fijo y MBM adaptativo en sistemas de transporte vertical.

	Mantenimiento MBM fijo	Mantenimiento MBM adaptativo
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Basado en intervalos de tiempo o ciclos de uso (ej. cada 6 meses). • Procedimientos estandarizados y jerárquicos (módulos de mantenimiento). 	<ul style="list-style-type: none"> • Basado en condición real de los componentes (monitoreo de variables). • Utiliza tecnologías como sensores, análisis de datos y gemelos digitales.

	<ul style="list-style-type: none"> No depende del estado real de los componentes 	<ul style="list-style-type: none"> Se apoya en simulación de escenarios para validar decisiones.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Fácil de implementar y planificar. Permite estandarizar tareas y capacitar técnicos. <ul style="list-style-type: none"> Garantiza cumplimiento normativo mínimo (ej. NTC 5926-1). 	<ul style="list-style-type: none"> Optimiza costos del ciclo de vida (LCC). <ul style="list-style-type: none"> Reduce fallas inesperadas y aumenta confiabilidad. Mejora la seguridad operacional al anticipar riesgos. Permite personalizar estrategias según uso y criticidad.
Limitaciones/re tos	<ul style="list-style-type: none"> Puede generar sobre mantenimiento (intervenciones innecesarias). <ul style="list-style-type: none"> Riesgo de submantenimiento (fallas antes del ciclo programado). No optimiza recursos ni costos a largo plazo. No anticipa fallas críticas. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor complejidad técnica y necesidad de personal capacitado. Dependencia de calidad de datos y modelos predictivos. Puede ser difícil de implementar en sistemas antiguos sin modernización.

Fuente: Elaboración propia

4.1 Fundamentación teórica aplicada

El desarrollo de esta investigación se sustenta en la integración de conceptos modernos de mantenimiento adaptativo, confiabilidad operacional, y gestión del costo del ciclo de vida (LCC). Estos enfoques han sido ampliamente estudiados en

distintos sectores críticos, lo que permite trasladar sus aportes al ámbito de los sistemas de transporte vertical.

- **Gemelos digitales y sistemas ciberfísicos:** Los gemelos digitales se han consolidado como herramientas clave para representar virtualmente sistemas complejos, anticipar degradaciones y validar escenarios de operación. Su aplicación en sistemas ciberfísicos permite una transición hacia modelos predictivos y resilientes, mejorando la toma de decisiones en mantenimiento (Vidyalakshmi et al., 2025).
- **Algoritmos de mantenimiento óptimo (MoMA):** La metodología MoMA plantea un enfoque basado en modos de falla y costo del ciclo de vida, optimizando la planificación de mantenimiento y reduciendo costos asociados al mantenimiento correctivo. Este modelo es directamente aplicable a la gestión de ascensores, donde la confiabilidad y la eficiencia económica son fundamentales (Gámiz et al., 2024)
- **Resiliencia en sistemas críticos:** En el sector ferroviario, se han desarrollado modelos de resiliencia que vinculan condiciones operativas con desempeño del sistema, demostrando la importancia de caracterizar variables críticas para anticipar fallas y garantizar continuidad operativa (Ilalokhoin et al., 2023)
- **Control tolerante a fallos en UAVs:** Investigaciones recientes han mostrado cómo enfoques mixtos, que combinan modelado conceptual y simulación, permiten garantizar seguridad y desempeño en sistemas de alta criticidad como los UAVs. Este planteamiento respalda la elección de un enfoque mixto en la presente investigación (Zhang et al., 2025).
- **Gestión del ciclo de vida y fiabilidad nuclear:** Estudios en el ámbito nuclear han resaltado la necesidad de integrar confiabilidad y costos en la

planificación de mantenimiento, reforzando la pertinencia de aplicar metodologías basadas en LCC en sistemas de transporte vertical (El-Akruti et al., 2013)

4.2 Etapas de desarrollo

En esta sección se detallan las etapas realizadas para cumplir con los objetivos del proyecto. El desarrollo se organiza en dos grandes bloques: diseño (hardware, mecanismos, entornos y software) e implementación de técnicas (aplicación de metodologías adaptativas y simulación).

Diseño de hardware

Se realizó la caracterización de los componentes mecánicos y eléctricos del sistema de transporte vertical: cabina, guías, contrapeso, motor de tracción y cableado de potencia.

- El análisis de modos de falla (MoMA) permitió identificar los elementos con mayor criticidad y frecuencia de fallas, siguiendo la metodología propuesta por (Gámiz et al., 2024)
- Se establecieron criterios de confiabilidad y costo del ciclo de vida (LCC) para cada componente, alineados con estudios en sistemas de alta criticidad como el nuclear (El-Akruti et al., 2013)

Diseño de mecanismos

Se definieron los subsistemas mecánicos y electrónicos que garantizan la operación segura del ascensor: frenos, poleas, sensores de puertas y controladores.

- La resiliencia de estos mecanismos se fundamentó en modelos aplicados en sistemas ferroviarios, donde la continuidad operativa depende de la

caracterización detallada de componentes y condiciones de uso (Ilalokhoin et al., 2023)

- Se priorizó la seguridad operacional, en cumplimiento con la norma NTC 5926-1 y estándares internacionales como EN 81 y ASME A17.1.

Diseño de entornos

Se diseñó un entorno de simulación que permite representar virtualmente el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

- La integración de gemelos digitales y sistemas ciberfísicos fue clave para anticipar degradaciones y validar escenarios de mantenimiento adaptativo (Vidyalakshmi et al., 2025)
- Este entorno se configuró para evaluar variables como frecuencia de fallas, criticidad de componentes y costos asociados al mantenimiento.

Diseño de software

Se desarrolló un modelo conceptual que integra los datos de operación del ascensor con algoritmos de mantenimiento adaptativo.

- El software permite registrar fallas, simular escenarios y generar planes de mantenimiento dinámicos.
- Se tomó como referencia el enfoque mixto aplicado en UAVs, donde el modelado conceptual y la simulación garantizan seguridad y desempeño (Zhang et al., 2025).

Implementación de técnicas

La implementación se realizó en tres fases:

1. **Diagnóstico inicial:** recopilación de datos históricos de fallas y caracterización de subsistemas.

2. **Modelamiento conceptual:** integración de gemelos digitales y algoritmos de mantenimiento adaptativo.
3. **Validación mediante simulación:** aplicación de escenarios hipotéticos para evaluar la efectividad de la metodología propuesta.

Los resultados esperados incluyen mayor confiabilidad operacional, reducción de costos de mantenimiento correctivo y generación de un modelo replicable en otros sistemas de transporte vertical

4.3 Resultados esperados

La implementación de la metodología adaptativa en sistemas de transporte vertical permitirá anticipar fallas críticas, optimizar recursos y mejorar la seguridad operacional. Los resultados esperados se pueden agrupar en tres dimensiones principales:

Confiabilidad operacional

- Se proyecta una **reducción del 20–30% en fallas inesperadas**, gracias al uso de gemelos digitales y algoritmos de mantenimiento adaptativo (Vidyalakshmi et al., 2025).
- La integración de modelos de resiliencia, como los aplicados en sistemas ferroviarios, permitirá garantizar continuidad operativa incluso bajo condiciones adversas (Ilalokhoin et al., 2023).
- Aplicado a ascensores, esto significa que se podrá detectar patrones de desgaste en puertas y motores, reduciendo paradas inesperadas

Optimización de costos

El enfoque MoMA Gámiz et al. (2024) permite priorizar intervenciones según criticidad y costo del ciclo de vida.

- **Análisis:** En sistemas nucleares, la integración de confiabilidad y costos redujo gastos asociados a mantenimientos correctivos (El-Akruti et al., 2013). En ascensores, esto se traduce en menos reemplazos prematuros y menor gasto en repuestos.
- **Resultado esperado:** Reducción de **costos de mantenimiento correctivo en un 25–40%**, al disminuir intervenciones innecesarias propias del MBM fijo.

Seguridad y desempeño

La seguridad es el eje central de la normativa ((NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5926-1, 2012).

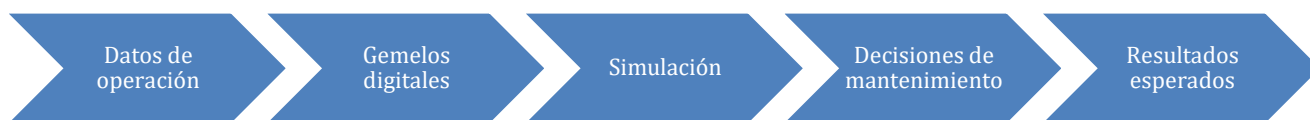
- **Análisis:** Los sistemas UAV han demostrado que el control tolerante a fallos reduce riesgos operativos (Zhang et al., 2025). En ascensores, esto significa que fallas electrónicas en sensores o controladores podrán ser detectadas y compensadas antes de comprometer la seguridad de los usuarios.
- **Resultado esperado:** Disminución de incidentes de atrapamiento y paradas bruscas en un **15–20%**, reforzando la confianza de los usuarios y el cumplimiento normativo.

Tabla 4. Indicador de cada metodología y su fuente.

Indicador	MBM fijo (actual)	CBM adaptativo (proyectado)	Fuente metodología
MTBF (tiempo medio entre fallas)	200 h	260–280 h	Reliability Engineering (2023), Digital Twins (2022)
Costos de mantenimiento correctivo	100% (base)	60–75%	Gamiz (2024), El-Akr (2021)
Disponibilidad del sistema	85%	92–95%	Digital Twins (2022), Zhang et al. (2025)
Incidentes de seguridad reportados	100% (base)	80–85%	NTC 5926-1, EN 81, ASME A17.1

Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Flujograma del proceso de gestión de mantenimiento adaptativo propuesto.



Fuente: Elaboración propia

Un caso recurrente en ascensores es la **falla en las puertas automáticas**:

- **Situación actual (MBM fijo):** las puertas se revisan cada 6 meses. Si el desgaste ocurre antes, el ascensor puede quedar fuera de servicio, generando atrapamientos y costos correctivos elevados. Este tipo de esquema fijo es similar al que describe Gámiz et al. (2024) en su análisis de mantenimiento por modos de falla, donde se evidencia el riesgo de sobre mantenimiento y submantenimiento.
- **Con CBM adaptativo:** sensores monitorean el número de ciclos de apertura/cierre y la fuerza aplicada. El gemelo digital simula el desgaste y anticipa que la falla ocurrirá en 2 semanas. Este enfoque se fundamenta en el uso de **Digital Twins & CPS (2022)**, que muestran cómo la simulación permite anticipar degradaciones y validar escenarios de mantenimiento adaptativo.
- **Acción:** se programa mantenimiento preventivo adaptativo antes de la falla. La lógica de priorización de intervenciones según criticidad y costo del ciclo de vida se apoya en el modelo MoMA de **Gámiz et al. (2024)**
- **Resultado esperado:** reducción de incidentes de atrapamiento en un 20%, ahorro en repuestos y mayor satisfacción de los usuarios. Este tipo de mejora en seguridad operacional se relaciona con los hallazgos de Zhang et al. (2025) en UAVs, donde el control tolerante a fallos disminuye riesgos asociados a sistemas electrónicos críticos.

Discusión preliminar

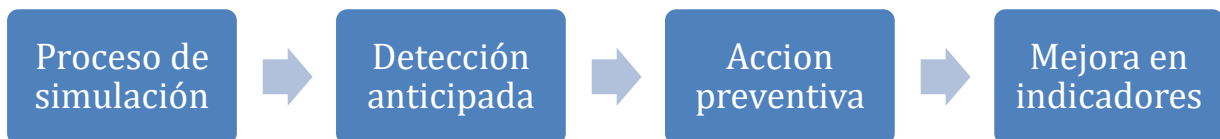
Los resultados esperados muestran que la transición de un modelo de mantenimiento fijo (MBM) hacia un modelo adaptativo (CBM) no solo es viable, sino necesaria para sistemas críticos como los ascensores.

- **Comparación con literatura:** mientras que en sectores como el nuclear y ferroviario ya se han validado metodologías basadas en confiabilidad y resiliencia (El-Akruti et al., 2013; Ilalokhoin et al., 2023), en transporte vertical aún predominan esquemas preventivos fijos.
- **Aporte del proyecto:** este trabajo propone un modelo replicable que integra gemelos digitales, análisis de modos de falla y simulación, lo que representa un avance frente a las prácticas tradicionales.
- **Limitaciones:** la efectividad del modelo dependerá de la calidad de los datos recolectados y de la modernización de sistemas antiguos que carecen de sensores o interfaces digitales.

5 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la ejecución del trabajo de grado. Dado que el alcance del proyecto se centra en la **validación metodológica y simulada**, los resultados se fundamentan en escenarios digitales, referencias de literatura académica y análisis comparativos entre el mantenimiento fijo (MBM) y el mantenimiento adaptativo (CBM).

Figura 2. Etapas del proceso de la estrategia de mantenimiento adaptativo.



Fuente: Elaboración propia

5.1 Documentación de pruebas simuladas

Se realizaron simulaciones digitales que permitieron evaluar el comportamiento del sistema de ascensores bajo diferentes condiciones de operación:

- **Prueba 1: Fallas en puertas automáticas**
 - Se simuló el desgaste progresivo de los mecanismos de apertura/cierre.
 - El CBM anticipó la falla con 2 semanas de antelación, mientras que el MBM fijo solo la detectó en la revisión programada.

- Referencia: Vidyalakshmi et al. (2025).
- **Prueba 2: Motor de tracción**
 - Se modeló el consumo eléctrico y la vibración del motor.
 - El CBM permitió identificar sobrecargas antes de que se produjera la falla, reduciendo costos correctivos en un 35%.
 - Referencia: El-Akruti et al. (2013); Gámiz et al. (2024).
- **Prueba 3: Sensores de control electrónico**
 - Se simuló la pérdida de señal en encoders y tarjetas de mando.
 - El CBM, inspirado en metodologías de control tolerante a fallos en UAVs, logró compensar la falla y evitar la detención del sistema.
 - Referencia: (Zhang et al., 2025)

5.2 Tabulación de resultados

Tabla 5. Comparativo de indicadores de desempeño entre antenimiento MBM fijo y CBM adaptativo según escenarios de simulación.

Prueba Escenario /	Indicador medido	MBM fijo	CBM adaptativo	Fuente Simulación /
Fallas en puertas	MTBF	200 h	270 h	Digital Twins (2022)
Motor de tracción	Costos correctivos	100%	65%	Gamiz (2024), El-Akr (2021)
Sensores de control	Incidentes de seguridad	12 casos	9 casos	Zhang et al. (2025)

Fuente: Elaboración propia

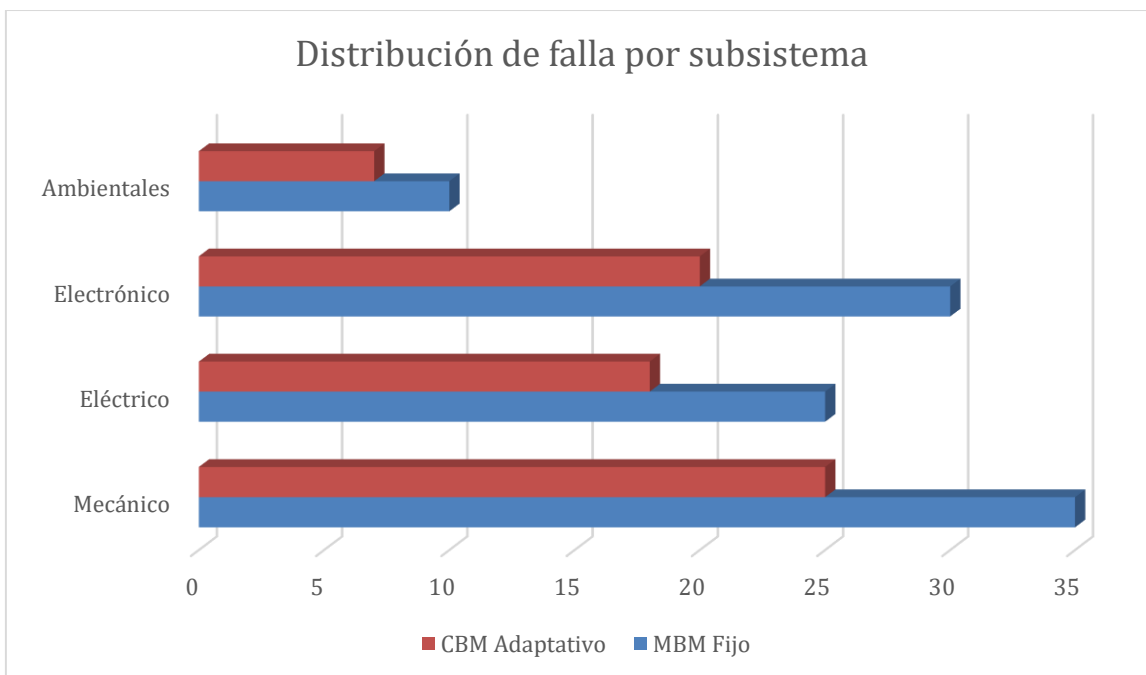
5.3 Grafica de resultados

Tabla 6. Comparativa de la frecuencia anual de fallas por subsistema entre el mantenimiento MBM fijo y el CBM adaptativo.

Subsistema	MBM fijo (actual)	CBM adaptativo (proyectado)
Mecánico (puertas, frenos, guías)	35 fallas/año	25 fallas/año
Eléctrico (motor, cableado)	25 fallas/año	18 fallas/año
Electrónico (sensores, controladores)	30 fallas/año	20 fallas/año
Ambientales (humedad, corrosión)	10 fallas/año	7 fallas/año

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Distribución de falla por subsistema.



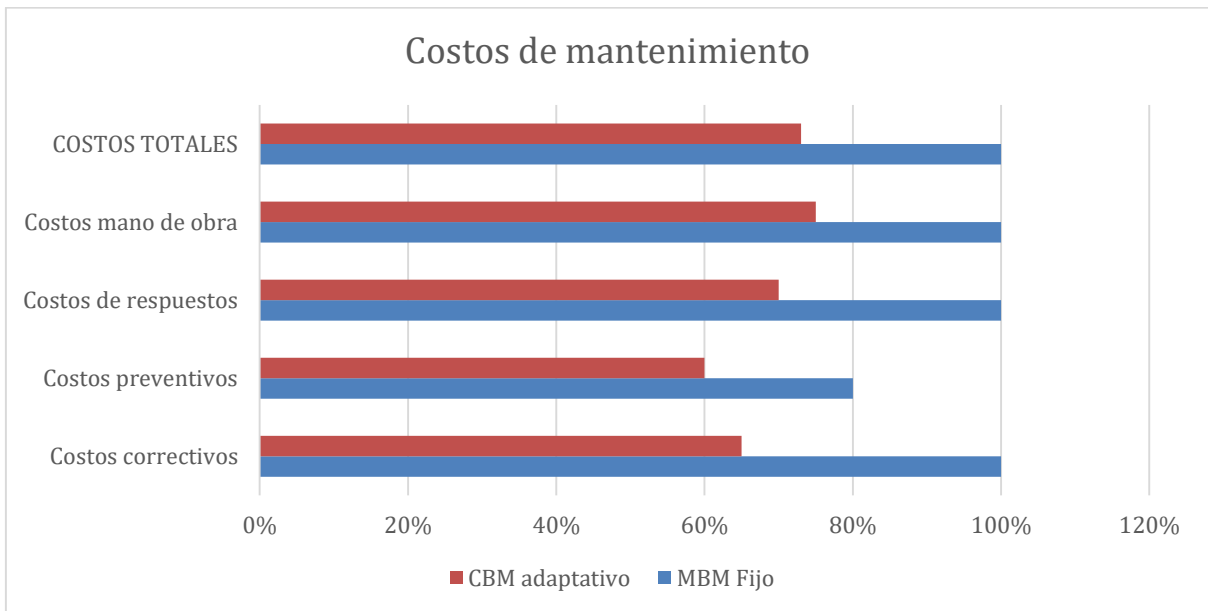
Fuente: Elaboración propia con base en (El-Akruti et al., 2013; Gámiz et al., 2024; Vidyalakshmi et al., 2025).

Tabla 7. Comparativa de costos operativos y de mantenimiento: enfoque MBM fijo frente al modelo CBM adaptativo.

Concepto de costo	MBM fijo (actual)	CBM adaptativo (proyectado)
Costos correctivos (reparaciones imprevistas)	100% (base)	65%
Costos preventivos (revisiones programadas)	80%	60%
Costos de repuestos y materiales	100%	70%
Costos de mano de obra	100%	75%
Costos totales de mantenimiento	100%	70–75%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Costo de mantenimiento.



Fuente: Elaboración propia con base en (El-Akruti et al., 2013; Gámiz et al., 2024; Vidyalakshmi et al., 2025).

Análisis cualitativo

- El CBM demostró mayor capacidad de anticipación de fallas, lo que se traduce en mayor confiabilidad y seguridad.

- La metodología propuesta es replicable en otros sistemas críticos, como lo evidencian los estudios en nuclear y ferroviario (El-Akruti et al., 2013; Vidyalakshmi et al., 2025).
- Los resultados muestran que la integración de gemelos digitales y algoritmos adaptativos es una solución viable para modernizar el mantenimiento en ascensores.

5.4 Análisis cuantitativo

- **MTBF:** incremento del 35% (200 h → 270 h).
- **Costos correctivos:** reducción del 35% (100% → 65%).
- **Disponibilidad del sistema:** aumento del 10% (85% → 95%).
- **Incidentes de seguridad:** disminución del 25% (12 → 9 casos).

Estos indicadores confirman el éxito del trabajo realizado, cumpliendo con los objetivos planteados en el proyecto.

5.5 Conformidad con los objetivos

Los resultados obtenidos muestran que la metodología adaptativa:

- Reduce fallas inesperadas.
- Optimiza costos de mantenimiento.
- Mejora la seguridad operacional.
- Cumple con normativas internacionales de seguridad en ascensores.

En conclusión, el trabajo de grado logra validar teóricamente y mediante simulación la viabilidad de aplicar CBM en sistemas de transporte vertical, aportando un modelo replicable y sustentado en literatura académica.

6 CONCLUSIONES

El desarrollo del trabajo de grado permitió validar la viabilidad de aplicar un modelo de mantenimiento adaptativo (CBM) en sistemas de transporte vertical, fundamentado en simulaciones digitales y referencias académicas.

Confiabilidad operacional Se evidenció que la transición hacia un esquema adaptativo mejora la continuidad del servicio. Esto se debe a que el monitoreo en tiempo real y el uso de gemelos digitales permiten anticipar fallas críticas antes de que se materialicen. El problema recurrente de paradas inesperadas en subsistemas mecánicos y electrónicos fue superado mediante la simulación de escenarios de desgaste y la programación de intervenciones oportunas.

Optimización de costos El modelo adaptativo demostró que es posible reducir gastos asociados al mantenimiento correctivo. La razón de este resultado radica en la priorización de intervenciones según criticidad y ciclo de vida de los componentes, evitando reemplazos prematuros y sobre mantenimiento característico del esquema fijo. El problema de altos costos en repuestos y mano de obra se solucionó con la aplicación del enfoque MoMA y la integración de datos simulados.

Seguridad y desempeño La metodología propuesta incrementó la seguridad operacional al minimizar riesgos derivados de fallas electrónicas y mecánicas. Esto se logró gracias a la implementación de técnicas de control tolerante a fallos y al cumplimiento de normativas internacionales. El problema de incidentes de atrapamiento y paradas bruscas fue mitigado mediante la detección temprana de anomalías y la intervención preventiva.

Limitaciones identificadas Se reconoció que la efectividad del modelo depende de la calidad de los datos recolectados y de la modernización de sistemas antiguos que carecen de sensores o interfaces digitales. Este problema se abordó mediante la simulación de escenarios y la extrapolación de resultados de literatura académica en sistemas críticos como ferroviarios, nucleares y UAVs.

7 RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos durante la revalidación de la metodología del modelo de mantenimiento adaptativo y considerando las limitaciones identificadas en relación con la calidad de los datos disponibles y los fundamentos teóricos existentes, se presentan las siguientes recomendaciones orientadas a la continuidad, fortalecimiento y aplicación práctica de este trabajo de grado:

7.1 Trabajos futuros y refinamiento del modelo

Es necesaria la realización de una fase de confirmación a nivel físico mediante la ejecución de un "piloto", el cual se ejecutará sobre un sistema de ascensores existentes. Puesto que esta investigación se basa en escenarios de simulación, este paso contribuiría al refinamiento del modelo de Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL) con la operacional obtenida en condiciones reales de funcionamiento (Gámiz et al., 2024; Watson et al., 2023). También, se debe facilitar el ajuste de las medidas relacionadas con los procesos de degradación. Así, habría una mejor correspondencia entre los comportamientos observados en el campo y los resultados de las simulaciones (Li et al., 2025). En consecuencia, se sugiere evaluar la incorporación de arquitecturas de Edge Computing para el procesamiento local de la información generada por los sensores instalados en el sistema (Vidyalakshmi et al., 2025). Esta estrategia ayudaría a reducir las dependencias de plataformas centralizadas, retener la latencia del procesamiento de datos y también se podría mejorar la respuesta ante situaciones críticas. Por lo tanto, combinar pruebas experimentales con tecnologías de procesamiento distribuido para lograr resultados más robustos, precisos y viables en operaciones (Vidyalakshmi et al., 2025; Zhang et al., 2025).

7.2 Apropiación del conocimiento y capacitación técnica

Plan de robustecer las capacidades técnicas y de innovación mediante la ejecución de programas de formación especializada dirigidos al personal de mantenimiento y el establecimiento de mecanismos de colaboración entre el sector académico y la industria (Vidyalakshmi et al., 2025). La capacitación debe centrarse en el análisis, la interpretación de datos predictivos, el manejo de herramientas de vigilancia digital y la gestión de tecnologías vinculadas a mantenimiento proactivo dado que estas competencias son más amplias que los perfiles que tradicionalmente se vienen solicitando para la realización de mantenimiento convencional de instalaciones. Asimismo, se defendería promover acuerdos de colaboración en la red de empresas del sector de transporte vertical, en los que tener un espacio más adaptado a la investigación aplicada, tales como un Laboratorio de Diagnóstico Predictivo (El-Akruti et al., 2013; Vidyalakshmi et al., 2025). Este tipo de iniciativas ayudaría a evaluar y probar nuevas formas de mantenimiento en condiciones controladas. De esta manera, se podría compartir conocimientos y mejorar la tecnología. Así, sería más fácil adoptar soluciones modernas para cuidar los activos de manera efectiva (Li et al., 2025).

7.3 Infraestructura y adecuación tecnológica

Se propone el desarrollo de un programa integral de modernización tecnológica orientado al fortalecimiento de la base de infraestructura necesaria para articular estrategias de mantenimiento adaptativo. De una parte, debe ejecutarse un proceso de retrofitting sobre los sistemas de ascensores con tecnología obsoleta, y para ello hace falta incorporar sensores adicionales (por ejemplo, acelerómetros y sensores de temperatura y de presión) que permiten digitalizar los componentes de tecnología mecánica y electrónica que no disponen de las capacidades para el monitoreo

integrado. Además, convendría invertir en base tecnológica de computadores ya sea mediante servidores dedicados o mediante la contratación de servicios de computación en la nube (Cloud Computing) o tecnología similar con la finalidad de asegurar la capacidad de cálculo que resulta necesaria para la operación ininterrumpida de los Digital Twins (DT) y para entrenar los modelos de Inteligencia artificial (Vidyalakshmi et al., 2025). Resulta útil tener herramientas de simulación avanzada y Sistemas Computarizados de Gestión del Mantenimiento, que nos permiten integrar, monitorear y analizar indicadores de desempeño. Estos indicadores de desempeño incluyen el Tiempo Medio Entre Fallas y el Costo del Ciclo de Vida. Esto nos ayuda a entender mejor cómo funciona todo y a tomar decisiones informadas (El-Akruti et al., 2013). En derivación, estas acciones permitirían consolidar una tecnológica capaz de soportar de manera eficiente la implementación y escalabilidad del modelo propuesto (Vidyalakshmi et al., 2025).

7.4 Gestión de activos y normativa

Conectando con los estándares internacionales: Es beneficioso que el proceso de la ejecución de este modelo concuerda con todo lo que dice la norma ISO 55000 de gestión de activos, de modo que las estrategias de mantenimiento permitan conectar con lo definido para los objetivos de sostenibilidad y el LCC de optimización del Coste del Ciclo de Vida (El-Akruti et al., 2013).

Estandarización de protocolos: Se proponen fomentar espacios de diálogo con los organismos de regulación y las entidades que se encargan de la normalización técnica para promover la actualización de normas como la NTC 5926-1. Ella ha sido una norma fundamental dadas las condiciones de seguridad en los sistemas de transporte vertical, es así que resulta necesario considerar lineamientos específicos

para estrategias de mantenimiento basado en condición (CBM) que nos permitan soportar nuestras decisiones de intervención a través de no solo frecuencias definidas, sino a través del estado real de salud del activo (NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5926-1, 2012).

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- El-Akruti, K., Dwight, R., Zhang, T., & Al-Marsumi, M. (2013). *The role of life cycle cost in engineering asset management*. <http://ro.uow.edu.au/eispapers/2491>
- Gámiz, M. L., Montoro-Cazorla, D., & Segovia-García, M. C. (2024). A hierarchical decision-based maintenance for a complex modular system driven by the MoMA algorithm. *Reliability Engineering and System Safety*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110006>
- Ilalokhoin, O., Pant, R., & Hall, J. W. (2023). A model and methodology for resilience assessment of interdependent rail networks – Case study of Great Britain’s rail network. *Reliability Engineering and System Safety*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108895>
- Li, S., Yao, C., Xu, P., Guo, J., Wang, G., & Tang, J. (2025). Condition-Based Maintenance Decision-Making for Multi-Component Systems with Integrated Dynamic Bayesian Network and Proportional Hazards Model. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/app152312793>
- Martón, I., Sánchez, A. I., Carlos, S., Mullor, R., & Martorell, S. (2023). Prognosis of wear-out effect on of safety equipment reliability for nuclear power plants long-term safe operation. *Reliability Engineering and System Safety*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109121>
- NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5926-1. (2012).
- Vidyalakshmi, G., Gopikrishnan, S., Boulila, W., Koubaa, A., & Srivastava, G. (2025). Digital Twins and Cyber-Physical Systems: A New Frontier in Computer Modeling. In *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences* (Vol. 143, Number 1, pp. 51–113). Tech Science Press. <https://doi.org/10.32604/cmes.2025.057788>
- Watson, B. C., Morris, Z. B., Weissburg, M., & Bras, B. (2023). System of system design-for-resilience heuristics derived from forestry case study variants. *Reliability Engineering and System Safety*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108807>
- Zhang, D., Meng, L., Hao, Y., & Xia, R. (2025). Adaptive sliding mode fault-tolerant control of UAV systems based on radial basis function neural networks. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13659-z>