

**Metodología para la estructuración de planes de mantenimiento unificados en la  
infraestructura ferroviaria: un enfoque desde el estado del arte y las buenas prácticas**

Freddy Pulgarín Arias

Asesor

Mario Andrés Gómez Ramos

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD, por ilustrarme en el modelo de formación independiente, autónomo y virtual, que me enseñó una manera distinta de aprender, desarrollando en mí la disciplina, la autonomía y la capacidad de potencializar mis habilidades profesionales y personales.

De manera especial, expreso mi gratitud a los líderes de la carrera de Ingeniería Electrónica, quienes en diferentes momentos me brindaron orientación, guía y acompañamiento. Sus aportes fueron fundamentales para cumplir paso a paso con los requisitos académicos y avanzar con orden en el desarrollo de mi malla curricular, hasta alcanzar esta etapa culminante de mi formación.

Asimismo, agradezco al Consorcio GMQ – Gerencia Metro de Quito, y en particular a los directivos y jefes de Bustren, en especial a, Raúl Talavera e Irina Cebotari, por permitirme enfocar esta monografía en el ámbito ferroviario. Gracias a su apoyo, tuve la oportunidad de adquirir conocimientos por mano propia y acceder a herramientas valiosas que me permitieron aplicar de manera práctica lo aprendido. Su aporte ha sido decisivo para consolidar el trabajo que hoy presento.

## Dedicatoria

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, fuente de fuerza, sabiduría y guía en cada paso de este camino en la universidad. Sin Su ayuda y bendición, este logro no habría sido posible.

A mi amada compañera de vida Maricruz, quien siempre creyó en mí y me motivó a reiniciar mi formación profesional. Gracias por tu apoyo incondicional, por tu paciencia y por recordarme en los momentos difíciles la importancia de seguir adelante.

A mi madre, quien con su respaldo estuvo a mi lado en los instantes de mayor necesidad, dándome el ánimo necesario para no rendirme.

Y finalmente, a ti, mi hijo Matías. Este esfuerzo lo hago por ti. Desde tu condición de discapacidad me has inspirado a salir adelante con el firme propósito de enorgullecerte y brindarte un mejor futuro. Eres mi motor, mi razón y mi mayor motivación para seguir construyendo un camino de esperanza y superación.

En memoria del Ingeniero Bryan Stewar Ramírez García, compañero ejemplar y profesional íntegro que siempre creyó en mí. Tu rápida partida nos dejó un vacío profundo, pero tu legado humano y ferroviario permanece vivo en quienes tuvimos la oportunidad de compartir contigo. Gracias por tu confianza, por tus enseñanzas y por ayudarme a seguir adelante en este camino profesional.

## Resumen

La presente monografía aborda la importancia de contar con planes de mantenimiento organizados y estandarizados para la infraestructura ferroviaria, con el fin de aportar a la seguridad operativa, la continuidad del servicio y la planificación eficiente de los recursos. El documento se centra en la revisión del estado del arte y en la normatividad aplicable al mantenimiento ferroviario, identificando los sistemas clave que requieren gestión sistemática, por ejemplo, el sistema de telecomunicaciones, climatización, energía, sistemas PCI, ventilación y señalización.

A partir de esta revisión, se propone una metodología de estructuración de planes de mantenimiento, basada en criterios técnicos, recomendaciones de fabricantes y buenas prácticas de gestión de activos, que incluye la definición de actividades preventivas, la organización por sistemas funcionales, y la integración de herramientas como indicadores de desempeño (KPI) y software de gestión. Finalmente, se resalta la relevancia de la estandarización y digitalización de los procesos de mantenimiento como pasos necesarios para la modernización y sostenibilidad del transporte ferroviario.

Este tipo de solución, además de sustentarse en un estudio del estado del arte desde un enfoque interdisciplinario, se orienta al análisis y aplicación de tecnologías propias de la ingeniería electrónica en la infraestructura ferroviaria. Entre estas se incluyen la telemetría, las telecomunicaciones, los sistemas SCADA, los sistemas de monitoreo continuo, las protecciones eléctricas y los sistemas electrónicos de control.

En este contexto, se abordan temáticas de alta relevancia técnica dentro de las ciencias aplicadas, integrando aportes de la ingeniería de mantenimiento, la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica, la ingeniería electrónica y la ingeniería electromecánica. Esta articulación

disciplinar permite construir una metodología aplicada para la estructuración de planes de mantenimiento, capaz de cubrir de manera integral las necesidades de los distintos subsistemas que conforman la infraestructura ferroviaria y que, además, puede ser extrapolada a otros entornos de infraestructura industrial.

La gestión del mantenimiento ferroviario representa un desafío complejo debido a la gran cantidad de sistemas que conforman la infraestructura y a la necesidad de garantizar su funcionamiento seguro y continuo. Teniendo en cuenta esto, los manuales de fabricantes y las recomendaciones técnicas suelen proporcionar instrucciones independientes para cada elemento, pero carecen de una visión unificada que facilite la planificación integral. Esta monografía no busca validar un plan en un entorno real, sino proponer una metodología para la estructuración de planes de mantenimiento. El propósito es ofrecer puntos de partida metodológicos que sirvan como referencia para operadores y responsables de infraestructuras ferroviarias, contribuyendo a la estandarización, digitalización y modernización del mantenimiento en el sector.

***Palabras clave:*** Plan, Infraestructura, Ferroviario, Mantenimiento, Metodología, Manuales, Estandarización.

## Abstract

This monograph addresses the importance of having organized and standardized maintenance plans for railway infrastructure, with the aim of contributing to operational safety, service continuity, and efficient resource planning. The document focuses on the review of the state of the art and the applicable regulations related to railway maintenance, identifying key systems that require systematic management, such as telecommunications, HVAC systems, power supply, fire protection systems (FPS), ventilation, and signaling.

Based on this review, a methodology for structuring maintenance plans is proposed, grounded in technical criteria, manufacturers' recommendations, and asset management best practices. This methodology includes the definition of preventive maintenance activities, functional system-based organization, and the integration of tools such as key performance indicators (KPIs) and maintenance management software. Finally, the relevance of standardization and digitalization of maintenance processes is highlighted as necessary steps toward the modernization and sustainability of railway transportation.

This type of solution, in addition to being supported by a state-of-the-art review from an interdisciplinary perspective, is oriented toward the analysis and application of technologies inherent to electronic engineering within railway infrastructure. These include telemetry, telecommunications, SCADA systems, continuous monitoring systems, electrical protection systems, and electronic control systems.

In this context, highly relevant technical topics within the applied sciences are addressed by integrating contributions from maintenance engineering, mechanical engineering, electrical engineering, electronic engineering, and electromechanical engineering. This interdisciplinary articulation enables the development of an applied methodology for structuring maintenance

plans capable of comprehensively addressing the needs of the various subsystems that make up railway infrastructure and that can also be extrapolated to other industrial infrastructure environments.

Railway maintenance management represents a complex challenge due to the large number of systems that make up the infrastructure and the need to ensure their safe and continuous operation. In this regard, manufacturers' manuals and technical recommendations usually provide independent instructions for each component but lack a unified perspective that facilitates comprehensive planning. This monograph does not seek to validate a maintenance plan in a real operational environment; instead, it proposes a methodology for the structuring of maintenance plans. Its purpose is to provide methodological starting points that may serve as a reference for railway operators and infrastructure managers, contributing to the standardization, digitalization, and modernization of maintenance practices in the railway sector.

***Keywords:*** Plan, Infrastructure, Railway, Maintenance, Methodology, Manuals, Standardization.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	15
Planteamiento del Problema .....	17
Pregunta de Investigación.....	19
Justificación .....	20
Objetivos .....	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos .....	22
Marco Referencial.....	23
Marco Teórico .....	23
Marco Conceptual.....	23
Marco Histórico .....	25
Estado Actual.....	25
Marco Legal.....	26
Protocolo .....	31
Definición de Criterios .....	32
Cadena de Búsqueda.....	34
Resultados Etapas de Revisión .....	37
Estado del Arte.....	40
Evolución del Mantenimiento Ferroviario y su Relación con la Ingeniería Electrónica.....	40
Planificación y Optimización del Mantenimiento Bajo Incertidumbre .....	41
Mantenimiento Predictivo y Monitoreo Inteligente de Condición .....	42
Visión Artificial, Inteligencia Artificial y Diagnóstico Automatizado .....	42

Gemelos Digitales, Big Data y Sistemas SCADA en el Mantenimiento Ferroviario .....	43
Infraestructura Ferroviaria, Degradación y Sostenibilidad.....	43
Integración del Mantenimiento Con la Operación Ferroviaria.....	44
Síntesis del Estado del Arte y Relación con la Propuesta Metodológica .....	44
Propuesta Metodológica.....	46
Revisión de la Normativa .....	46
Normativa Internacional .....	47
NFPA (National Fire Protection Association). .....	47
Uso de NFPA en Europa y América Latina .....	47
Importancia de la NFPA.....	48
Principales Normas de la NFPA .....	48
NFPA 130 y NFPA 25 en el Mantenimiento de Infraestructuras PCI .....	50
EN (European Norms) y UNE (Una Norma Española).....	51
Normas ISO. ....	54
Importancia de las Normas ISO. ....	54
Normas ISO Asociadas en el Ámbito Ferroviario. ....	54
PAS (Publicly Available Specification).....	55
Importancia de las Normas PAS .....	55
Normas PAS Asociadas en el Ámbito Ferroviario. ....	56
UIC (Union Internationale des Chemins de fer) .....	56
Importancia de las Normas UIC.....	56
Normas UIC Asociadas en el Ámbito Ferroviario.....	56
ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).....	57

	10
Importancia de las Normas ASHRAE.....	57
Normas ASHRAE Asociadas en el Ámbito Ferroviario.....	57
Manuales de Fabricantes y Operadores Ferroviarios.....	58
Experiencias Practicas .....	60
Metro de Quito, Consorcio Gerencia Metro de Quito (GMQ) .....	61
CAF (Construcciones y Auxiliares Ferroviarios) Colombia SAS .....	65
Definición de Criterios Técnicos de Mantenimiento.....	74
Mantenimiento Preventivo (Basado en Tiempo y Condición) .....	74
Mantenimiento Correctivo (Ante Fallas).....	75
Mantenimiento Predictivo (Diagnóstico Anticipado Mediante Sensores y Análisis de Datos)	
.....	76
Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM).....	77
MTTR (Mean Time To Repair / Mean Time To Resolution).....	81
MTBF (Mean Time Between Failures).....	81
Disponibilidad (A) .....	82
Tiempo de Respuesta (MTTA) .....	82
Cumplimiento del Mantenimiento Preventivo (CMP).....	83
Selección de Herramientas de Gestión en la Propuesta Metodológica .....	84
Enfoques de Gestión de Activos.....	84
Indicadores de Desempeño (KPI).....	85
Sistemas de Gestión Asistidos por Computador (CMMS/GMAO).....	85
Propuesta de Valor.....	86
Diseño del procedimiento metodológico.....	87

Levantamiento de Información Técnica de Cada Sistema.....	88
Clasificación de Activos y Jerarquización de Criticidad .....	88
Definición de Actividades de Mantenimiento con Base en Normativas y Manuales.....	88
Establecimiento de Frecuencias y Recursos Necesarios.....	88
Integración de los Planes por Sistema en un Esquema Unificado .....	88
Validación Mediante Matrices de Criticidad y Análisis Costo-Beneficio.....	89
Digitalización y Trazabilidad del Mantenimiento .....	89
Importancia de la Digitalización en la Gestión Ferroviaria .....	90
Fichas de Mantenimiento como Base de la Estandarización.....	90
Registro Centralizado y Almacenamiento de la Información.....	93
Plataforma Digital para la Gestión del Mantenimiento .....	93
Trazabilidad y Planificación Colaborativa .....	94
Lineamientos Finales.....	94
Unificación de los Planes de Mantenimiento por Sistemas Funcionales.....	94
Estandarización de Formatos y Procedimientos .....	95
Mejora Continua Basada en Indicadores de Desempeño (KPI) .....	95
Aseguramiento de la Sostenibilidad Técnica y Operativa .....	96
Digitalización y Trazabilidad como Soporte Transversal .....	96
Síntesis.....	97
Conclusiones .....	98
Recomendaciones .....	100
Referencias Bibliográficas .....	102

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Normativas Internacionales Aplicables al Mantenimiento Ferroviario</i> .....	27
<b>Tabla 2</b> <i>Criterios de Inclusión y Exclusión</i> .....	32
<b>Tabla 3</b> <i>Resultados de la Cadena de Búsqueda en IEEE Explore con CII</i> .....	36
<b>Tabla 4</b> <i>Resultados de la Cadena de Búsqueda en Science Direct con CII</i> .....	36
<b>Tabla 5</b> <i>Resumen Resultados de Revisión por Filtros de Inclusión y Exclusión para cada Base de Datos.</i> .....	38
<b>Tabla 6</b> <i>Comparativa de Herramientas de Gestión en Mantenimiento Ferroviario</i> .....	86
<b>Tabla 7</b> <i>Plataformas Digitales para la Gestión de Mantenimiento</i> .....	93
<b>Tabla 8</b> <i>Lineamientos Metodológicos</i> .....	97

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Identificación de Palabras Claves para las Referencias Bibliográficas</i> .....	31
<b>Figura 2</b> <i>Aplicación de la Ecuación de Búsqueda en IEEE Xplore donde Aplicamos el Criterio de Exclusión CE2</i> .....	35
<b>Figura 3</b> <i>Aplicación de la Ecuación de Búsqueda en Science Direct donde Aplicamos el Criterio de Exclusión CE2, CE4 y CI5</i> .....	35
<b>Figura 4</b> <i>Índice Plan de Mantenimiento Climatización</i> .....	62
<b>Figura 5</b> <i>Ejemplo de Lista de Inventario de Equipos</i> .....	63
<b>Figura 6</b> <i>Título Plan de Mantenimiento Trenes Metro de Medellín</i> .....	66
<b>Figura 7</b> <i>Intervalos de Mantenimiento Definidos por Kilometraje de las Unidades</i> .....	67
<b>Figura 8</b> <i>Identificación del Elemento Sistema de Freno y sus Elementos que lo Componen</i> .....	68
<b>Figura 9</b> <i>Índice Manual Descriptivo del Sistema de Freno</i> .....	70
<b>Figura 10</b> <i>Índice del Manual de Mantenimiento de la Pinza de Freno con Acumulador</i> .....	72
<b>Figura 11</b> <i>Actividades de Mantenimiento</i> .....	73
<b>Figura 12</b> <i>Ficha de Mantenimiento Energía Inspección Quincenal SET</i> .....	92

## Lista de Apéndices

<b>Apéndice A</b> <i>Plan de Mantenimiento de CAF para Trenes</i> .....	111
<b>Apéndice B</b> <i>Manual de Mantenimiento de Sistema de Freno de Tren CAF</i> .....	112
<b>Apéndice C</b> <i>Manual Descriptivo de Sistema de Freno de Tren CAF Colombia</i> .....	113
<b>Apéndice D</b> <i>Plan de Mantenimiento de GMQ Sistema de Climatización para el Metro de Quito</i> .....	114
<b>Apéndice E</b> <i>Ficha de Mantenimiento Inspección Quincenal de SET para SIEMENS Metro de Quito</i> .....	115

## Introducción

La infraestructura ferroviaria, aunque es un poco desconocida en Colombia, hace parte importante y es un núcleo estructural en el desarrollo de los sistemas de transporte masivo y sostenible, al cual estamos entrando ahora con el metro de Medellín, el tranvía de Ayacucho y el próximo metro de Bogotá, esta comprende un grupo de subsistemas técnicos que garantizan la continuidad, seguridad y eficiencia de la operación férrea. Entre estos subsistemas destacan los sistemas de telecomunicaciones, la señalización ferroviaria, la energía -delimitada en electrificación y distribución-, la climatización de cuartos técnicos de comunicaciones, la ventilación de estaciones y sistemas en infraestructura de túneles o infraestructuras de viaducto y la protección contra incendios (PCI), todos ellos con un nivel de criticidad que exige una gestión de mantenimiento organizada y sistemática (Iwnicki et al., 2020). La dificultad radica en que todos estos sistemas interactúan en su mantenimiento de una manera que no pueda entenderse únicamente desde la perspectiva correctiva, sino como un proceso integral que asegure la disponibilidad y confiabilidad de los activos a lo largo de su ciclo de vida (Moubray, 1997).

Históricamente, el mantenimiento ferroviario ha evolucionado desde enfoques correctivos hacia estrategias preventivas, predictivas y, más recientemente, hacia modelos basados en la condición y la confiabilidad, apoyados en tecnologías digitales e inteligencia de datos (Sedghi et al., 2021). Sin embargo, en muchos entornos, la gestión de los planes de mantenimiento continúa realizándose de manera dividida, siguiendo lineamientos particulares de fabricantes o normativas aisladas. Esta división genera duplicidad de tareas, poca trazabilidad y dificultades en la planificación integral de los mantenimientos, lo cual afecta directamente la eficiencia en la utilización de recursos y la seguridad operativa del sistema (Smith & Hawkins, 2004).

En este contexto, organismos internacionales han establecido marcos normativos y estándares que orientan la gestión de activos y del mantenimiento en infraestructuras críticas. Documentos como la norma ISO 55000 sobre gestión de activos (International Organization for Standardization [ISO], 2014), la especificación PAS 55 del British Standards Institution (2008) y la norma EN 50126, centrada en la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS) en el ámbito ferroviario (European Committee for Standardization [CEN], 2017), proporcionan lineamientos que permiten articular la práctica del mantenimiento con objetivos de sostenibilidad, trazabilidad y estandarización.

A partir de este marco, se reconoce la necesidad de contar con una metodología que unifique los planes de mantenimiento en la infraestructura ferroviaria, organizada por sistemas funcionales y soportada en buenas prácticas de gestión de activos. Tal enfoque no solo permitiría superar la fragmentación actual, sino que también contribuiría a optimizar los recursos disponibles, a mejorar la trazabilidad de las actividades y a consolidar una cultura de mantenimiento alineada con estándares internacionales.

La presente monografía tiene como propósito proponer una metodología de estructuración de planes de mantenimiento unificados, basada en la revisión del estado del arte, en normativas internacionales y en las recomendaciones de fabricantes, integrando herramientas de digitalización y medición de desempeño, como los indicadores clave (KPI). De esta manera, se busca ofrecer lineamientos metodológicos de referencia que sirvan a operadores, explotadores, ingenieros y constructores de infraestructura ferroviaria, aportando al avance hacia la modernización y sostenibilidad de este sector estratégico para la movilidad de los grandes centros urbanos.

## Planteamiento del Problema

La infraestructura ferroviaria está conformada por múltiples subsistemas técnicos - como telecomunicaciones, señalización, climatización, energía, ventilación y protección contra incendios (PCI), superestructuras, talleres, que, en su conjunto, garantizan la seguridad y continuidad de la operación. Cada uno de estos subsistemas dispone de manuales y recomendaciones de mantenimiento específicos por cada sistema y por cada elemento, los cuales orientan las intervenciones de forma independiente. No obstante, esta gestión fragmentada provoca limitaciones significativas en la planificación integral del mantenimiento, generando duplicidad de tareas, dispersión de recursos y escasa trazabilidad en los procesos de toma de decisiones (Smith & Hawkins, 2004).

La falta de un enfoque unificado conlleva a que las actividades preventivas y correctivas no siempre se desarrollen bajo una visión sistémica, lo que incrementa los riesgos de fallas, afecta la confiabilidad operativa y reduce la eficiencia en la administración de los recursos disponibles (Moubray, 1997). En consecuencia, la ausencia de metodologías consolidadas que integren criterios técnicos, normativos y de gestión de activos dificulta avanzar hacia prácticas de mantenimiento estandarizadas y alineadas con estándares internacionales como ISO 55000 (International Organization for Standardization [ISO], 2014), PAS 55 (British Standards Institution [BSI], 2008) o EN 50126 (European Committee for Standardization [CEN], 2017), los cuales orientan la optimización de los activos a lo largo de su ciclo de vida.

Ante esta situación, se plantea la necesidad de establecer una metodología que oriente la estructuración de planes de mantenimiento unificados, organizados por sistemas funcionales y fundamentados en el estado del arte, las normativas internacionales y las buenas prácticas de gestión de activos. Este enfoque permitiría superar la división actual y ofrecer un marco de

referencia metodológico para operadores, explotadores, ingenieros y gestores de infraestructura ferroviaria, contribuyendo a una mayor eficiencia, seguridad y sostenibilidad en el sector (Sedghi et al., 2021).

### **Pregunta de Investigación**

¿Cómo puede metodológicamente estructurarse un plan de mantenimiento unificado por sistemas funcionales en la infraestructura ferroviaria, basándolo en la normatividad internacional, y teniendo en cuenta las buenas prácticas de mantenimiento y la gestión de activos, con el fin de mejorar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad operativa de los sistemas de transporte masivos ferroviarios?

## Justificación

El mantenimiento de la infraestructura ferroviaria constituye un eje estratégico para garantizar la confiabilidad del servicio, la seguridad de los usuarios y la sostenibilidad del sistema de transporte (Iwnicki et al., 2020). La gestión aislada de los diferentes subsistemas, a partir de manuales de fabricantes y lineamientos particulares, limita la capacidad de planificar de manera integral y anticipar riesgos operativos. Esta fragmentación no solo incrementa la probabilidad de fallas, sino que también dificulta la optimización de recursos humanos, técnicos y financieros (Smith & Hawkins, 2004).

La propuesta de una metodología para estructurar planes de mantenimiento unificados responde a la necesidad de articular las actividades de mantenimiento bajo criterios comunes, organizados por sistemas funcionales y respaldados por herramientas de digitalización y trazabilidad, como los sistemas de gestión computarizada de mantenimiento (CMMS) y los indicadores clave de desempeño (KPI) (ISO, 2014). En este sentido, la metodología propuesta adquiere especial relevancia al incorporar un componente fundamental desde la ingeniería electrónica, a través del uso de sistemas de monitoreo, adquisición de datos, telemetría y automatización, que permiten una supervisión continua y objetiva del estado de los activos. No obstante, su alcance trasciende el enfoque disciplinar individual, ya que se sustenta en una articulación interdisciplinaria que integra aportes de la ingeniería de mantenimiento, mecánica, eléctrica, electrónica y electromecánica, con el propósito de consolidar una visión integral del mantenimiento. De este modo, se busca mejorar la eficiencia operativa, estandarizar los procesos y facilitar la toma de decisiones basada en información confiable y en datos técnicos verificables.

Asimismo, el aporte de este trabajo no se limita únicamente al ámbito técnico, sino que también tiene una proyección académica y estratégica. Desde el plano académico, ofrece

lineamientos metodológicos fundamentados en la literatura técnica y en estándares internacionales que pueden servir como referencia para futuras investigaciones (Moubray, 1997; Sedghi et al., 2021). Desde el plano operativo, representa una herramienta de apoyo para los responsables de la infraestructura ferroviaria, que podrán contar con un marco metodológico adaptable a diferentes contextos y escalas de operación.

En este sentido, esta monografía contribuye al fortalecimiento de la modernización y sostenibilidad del mantenimiento ferroviario, basándose en las prácticas internacionales y con los principios de la gestión de activos, lo que resulta fundamental para enfrentar los desafíos actuales de movilidad urbana y regional (CEN, 2017; ISO, 2014).

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Establecer una metodología para la creación de planes de mantenimiento unificados en la infraestructura ferroviaria, organizados por sistemas funcionales, con el fin de mejorar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad operativa.

### **Objetivos Específicos**

Realizar una revisión del estado del arte de los principales sistemas técnicos que componen la infraestructura ferroviaria (telecomunicaciones, climatización, energía, PCI, ventilación, superestructura y señalización).

Establecer criterios técnicos y herramientas de gestión que fundamenten la estructuración de planes de mantenimiento.

Elaborar un procedimiento metodológico para la creación de planes de mantenimiento organizados por sistemas funcionales.

Proponer lineamientos para la digitalización y trazabilidad de los planes de mantenimiento aplicables al entorno ferroviario.

## Marco Referencial

### Marco Teórico

El mantenimiento en la infraestructura ferroviaria es un componente esencial para garantizar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los sistemas de transporte. Según Moubray (1997), las prácticas de mantenimiento han evolucionado desde esquemas correctivos hacia metodologías avanzadas como el *Reliability-Centered Maintenance (RCM)*, que prioriza las funciones críticas y busca extender la vida útil de los activos.

La gestión de activos se ha consolidado como un marco teórico clave. La norma ISO 55000 (International Organization for Standardization [ISO], 2014) establece que los activos físicos deben administrarse bajo criterios de sostenibilidad, eficiencia y valor agregado. Así mismo, Smith y Hawkins (2004) advierten que la fragmentación en la planificación genera pérdidas de eficiencia y escasa trazabilidad. Frente a ello, herramientas como los sistemas de gestión computarizada de mantenimiento (CMMS) y los indicadores clave de desempeño (KPI) permiten mejorar la programación, medir resultados y apoyar la toma de decisiones (Sedghi et al., 2021).

En consecuencia, este marco teórico se apoya en las teorías de gestión de activos, la evolución de las metodologías de mantenimiento y el uso de tecnologías digitales como pilares para la estandarización y modernización de los planes ferroviarios.

### Marco Conceptual

Los principales conceptos asociados al mantenimiento ferroviario son:

- **Mantenimiento Correctivo:** intervenciones realizadas una vez ocurrida la falla, con altos costos de inactividad (Smith & Hawkins, 2004).

- Mantenimiento Preventivo: acciones programadas con base en frecuencia o tiempo para prevenir fallas (Moubray, 1997).
- Mantenimiento Predictivo: técnicas de monitoreo de condiciones que anticipan fallas en sistemas críticos (Sedghi et al., 2021).
- Gestión de Activos: conjunto de actividades coordinadas para maximizar el valor de los activos durante su ciclo de vida (ISO, 2014).
- RCM (Reliability-Centered Maintenance): metodología que asegura la confiabilidad de funciones esenciales del sistema (Moubray, 1997).
- CMMS (Computerized Maintenance Management System): software para planificar, registrar y dar trazabilidad al mantenimiento, creando bases de datos de gestión Documental o bases y softwares de datos como GMAO (Smith & Hawkins, 2004).
- GMAO: Gestión del Mantenimiento Asistida por Ordenador, es un **software** diseñado para planificar, organizar, ejecutar y controlar todas las actividades relacionadas con el mantenimiento de equipos, instalaciones o infraestructura.
- Sistemas Funcionales Ferroviarios: telecomunicaciones, energía, climatización, ventilación, PCI y señalización, interdependientes y críticos (Iwnicki et al., 2020).
- KPI (Key Performance Indicators): indicadores para evaluar desempeño, disponibilidad y confiabilidad (ISO, 2014).
- Fichas: documentos diseñados y creados para implementar rutinas de mantenimiento.
- Gestión Documental: maneras como se puede almacenar en un repositorio las rutinas ejecutadas de mantenimiento incluido las planificaciones siguientes del mantenimiento.

- Dossier: aglomeración de información técnica relevante de cada equipo de un sistema ferroviario, también se asume la creación de dossiers de almacenamiento de fichas de mantenimiento como parte de la gestión documental.

Estos conceptos constituyen la base para la estructuración de la metodología propuesta.

### **Marco Histórico**

Siglo XIX y primera mitad del XX: predominio del mantenimiento correctivo, con altos costos y tiempos de inactividad (Iwnicki et al., 2020).

Segunda mitad del siglo XX: introducción del mantenimiento preventivo y metodologías como el RCM, influenciadas por la aviación y la industria automotriz (Moubray, 1997).

Finales del siglo XX e inicios del XXI: consolidación del mantenimiento predictivo y uso de sensores para anticipar fallas.

Actualidad: digitalización y uso de sistemas CMMS y análisis de datos, adoptados ampliamente en redes ferroviarias de Japón, Alemania y España (Sedghi et al., 2021; CEN, 2017).

Este recorrido evidencia la necesidad de avanzar hacia metodologías integrales que integren normativas y tecnologías modernas.

### **Estado Actual**

En la actualidad, los sistemas ferroviarios enfrentan los siguientes retos:

Persistencia de planes fragmentados, basados en manuales de fabricantes, con duplicidad de tareas (Smith & Hawkins, 2004).

Avances en la adopción de estándares internacionales como la norma EN 50126 sobre confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS) (CEN, 2017).

Incorporación creciente de CMMS y soluciones de digitalización en operadores ferroviarios de Europa, Asia y América Latina (ISO, 2014).

Brecha entre la existencia de lineamientos normativos y su implementación práctica, lo que limita la estandarización de procesos (Sedghi et al., 2021).

Este panorama evidencia la necesidad de metodologías unificadas que integren criterios técnicos, normativos y de gestión de activos en un marco práctico y aplicable.

### **Marco Legal**

El marco normativo que orienta el mantenimiento ferroviario incluye:

ISO 55000 (2014): principios de gestión de activos físicos a lo largo del ciclo de vida.

PAS 55 (BSI, 2008): guía pionera de gestión de activos, antecedente de la ISO 55000.

EN 50126 (CEN, 2017): norma europea sobre confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS).

Lineamientos de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC): recomendaciones globales en infraestructura ferroviaria.

En el caso de Colombia, aunque la normatividad ferroviaria se encuentra en consolidación, se ha adoptado como referencia el marco internacional, integrándolo con disposiciones nacionales de seguridad industrial, transporte e infraestructura pública. Esta convergencia busca garantizar la confiabilidad, sostenibilidad y eficiencia de los sistemas ferroviarios en desarrollo. A continuación, se presenta en la *Tabla 1*, un resumen de las normativas aplicables al mantenimiento ferroviario.

**Tabla 1***Normativas Internacionales Aplicables al Mantenimiento Ferroviario*

Norma	Sistema ferroviario al que aplica	Aspecto regulado	Relación con planes de mantenimiento
NFPA 130	Sistemas de tránsito y ferrocarriles de pasajeros (subterráneos, de superficie y elevados)	Requisitos de seguridad contra incendios, evacuación, ventilación y protección de pasajeros	Sirve como norma base para el diseño, operación y mantenimiento de sistemas PCI en infraestructuras ferroviarias.
NFPA 25	Sistemas de protección contra incendios en infraestructuras ferroviarias	Inspección, prueba y mantenimiento de rociadores, válvulas, mangueras y tuberías	Aporta lineamientos preventivos y correctivos para mantener operativos los sistemas PCI de estaciones y túneles.
EN 45545	Material rodante ferroviario	Reacción y resistencia al fuego de componentes y materiales en trenes	Complementa a NFPA 130, asegurando que trenes cumplan con requisitos de seguridad en caso de incendio.

Norma	Sistema ferroviario al que aplica	Aspecto regulado	Relación con planes de mantenimiento
UNE-EN 17023:2019	Material rodante ferroviario (trenes, locomotoras, coches)	Establece directrices para la creación y modificación de planes de mantenimiento en vehículos ferroviarios.	Es la base para estructurar y documentar planes unificados de mantenimiento, asegurando trazabilidad, seguridad y ciclo de vida de los activos.
UNE-EN 15313	Material rodante – Ejes montados (en servicio y fuera de vehículo)	Requisitos para la inspección, mantenimiento y sustitución de ejes montados, un componente crítico de seguridad.	Integra actividades específicas en los planes de mantenimiento preventivo, evitando fallos catastróficos y alargando la vida útil de los ejes.
UNE-EN 15085	Vehículos ferroviarios y componentes estructurales soldados	Requisitos de soldadura en fabricación y mantenimiento.	Define criterios de inspección y reparación de soldaduras, esenciales en mantenimientos de ciclo largo y rehabilitación de trenes.

Norma	Sistema ferroviario al que aplica	Aspecto regulado	Relación con planes de mantenimiento
UNE-EN 14033 (serie)	Maquinaria de construcción y mantenimiento de vía (bateadoras, niveladoras, etc.)	Requisitos de diseño, seguridad y mantenimiento de máquinas de vía.	Aporta directrices para el mantenimiento seguro y eficiente de la maquinaria que interviene en conservación de infraestructura ferroviaria.
UIC (Union Internationale des Chemins de fer)	Infraestructura, señalización y operación ferroviaria	Estándares internacionales para interoperabilidad, seguridad y mantenimiento ferroviario	Permite armonizar prácticas de mantenimiento entre operadores a nivel global.
CENELEC EN 50126 / 50128 / 50129 (RAMS)	Señalización, control y seguridad ferroviaria	Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad y Seguridad (RAMS) en sistemas ferroviarios	Aseguran que los planes de mantenimiento consideren criterios de confiabilidad y riesgo en señalización y control.
IEC 62290	Señalización y control ferroviario (CBTC)	Normas para sistemas de control de trenes	Establece pruebas y mantenimiento periódico

Norma	Sistema ferroviario al que aplica	Aspecto regulado	Relación con planes de mantenimiento
		basados en comunicaciones	de sistemas de señalización críticos para la seguridad ferroviaria.

*Nota.* Tabla de revisión de Normativas y sus aplicaciones.

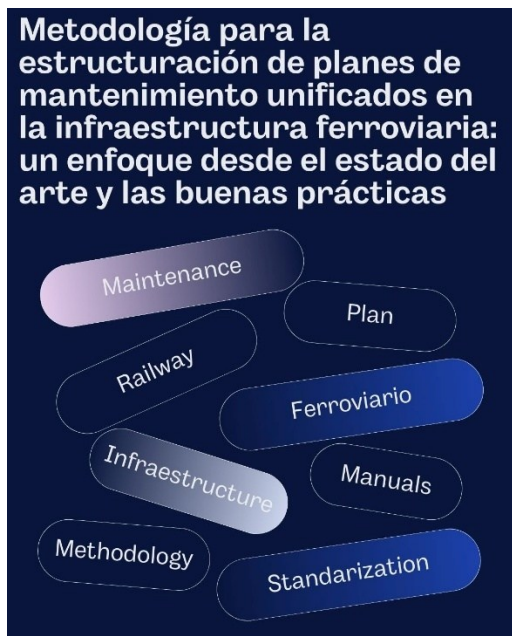
La revisión de estas normativas internacionales evidencia que el mantenimiento ferroviario no puede concebirse únicamente como una actividad técnica, sino como un proceso estratégico que integra criterios de seguridad, confiabilidad y sostenibilidad operativa. La aplicación de estándares como la NFPA 130 y 25, la EN 45545, los lineamientos de la UIC, las normas RAMS de CENELEC y la IEC 62290, permite estructurar planes de mantenimiento más robustos y homogéneos, facilitando la interoperabilidad entre sistemas y operadores a nivel global. De esta forma, la estandarización normativa constituye un eje fundamental para garantizar la continuidad del servicio y la protección integral de la infraestructura y de los usuarios.

## Protocolo

Para llevar a cabo esta investigación en Metodología para la estructuración de planes de mantenimiento unificados en la infraestructura ferroviaria: un enfoque desde el estado del arte y las buenas prácticas, se realiza una adaptación protocolaria propuesta por (Z. Yang et al., 2014) para una revisión sistemática. En este sentido, se utilizaron diferentes Bases de datos de búsqueda como IEEE Xplore, Scopus y Science Direct, con el objetivo de identificar los términos comunes y palabras claves que se ilustran en la Figura 1, con el fin de mejorar la precisión en la identificación de los artículos que serán evaluados en este documento.

### Figura 1

*Identificación de Palabras Claves para las Referencias Bibliográficas*



*Nota.* Nube de palabras clave de la investigación de elaboración propia con la herramienta en línea Canva.

Luego de esta búsqueda realizada, se optó por tener en cuenta las Bases de datos científicas de investigación de las plataformas IEEE Xplore y Science Direct, debido a su amplio alcance, calidad de contenido, capacidad de búsqueda con filtros avanzados y definiciones especiales de revistas asociadas a los ámbitos de investigación de este proyecto como lo es el mantenimiento ferroviario. Estas plataformas permiten realizar búsquedas avanzadas mediante palabras clave, filtros temáticos, tipos de publicación y rangos de fechas, lo que facilita acceder a estudios actualizados, experiencias reales en operación ferroviaria y propuestas metodológicas reconocidas internacionalmente. Con base en esta exploración inicial, se diseñó un protocolo de búsqueda que permitió organizar las palabras clave asociadas al proyecto y filtrar con mayor precisión los documentos que aportan valor directo a la propuesta metodológica planteada en esta investigación.

### **Definición de Criterios**

A partir de los resultados de búsqueda, se establecieron los Criterios de Inclusión y Exclusión que se muestran en la Tabla 2, para seleccionar los artículos más relevantes en la revisión bibliográfica resaltando las investigaciones asociadas al mantenimiento en las infraestructuras ferroviarias y que tengan que ver con metodologías o aplicaciones relacionadas con la planificación de rutinas de mantenimiento a nivel ferroviario:

**Tabla 2**

*Criterios de Inclusión y Exclusión*

Criterios de Inclusión		Criterios de Exclusión	
CII	Artículos científicos, conferencias, estudios del arte y estándares.	CE1	Dada la naturaleza del estudio se excluyen los artículos de menos de 10

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
<p>CI2 Las búsquedas deben estar relacionadas a implementaciones en mantenimiento ferroviario de cualquier sistema conocido a nivel de infraestructuras ferroviarias.</p>	<p>páginas, debido a que deben ser estudios con alto detalle y profundidad</p> <p>CE2 Se excluyen todos los estudios que sean inferiores al año 2021, ósea estudios de los últimos 5 años, ya que necesitamos estudios más recientes en tecnologías ferroviarias.</p>
<p>CI3 Los términos de la Cadena de Búsqueda deben estar presentes en el título y en el contenido de los artículos.</p>	<p>CE3 Se excluyen aquellos estudios que no estén citados por otras personas o por otros investigadores, ya que se busca evaluar las soluciones con respaldo y reconocimiento en la comunidad científica, considerando un período de tiempo razonable para que los estudios sean evaluados y validados por otros investigadores antes de su implementación.</p>
<p>CI4 Se tienen en cuenta solo estudios asociados a la ingeniería del transporte ferroviario.</p>	<p>CE4 Aplicado en Science Direct a la terminación de estudios en Ingeniería.</p>
<p>CI5 Aplicado en Science Direct para incluir solo los archivos o estudios de acceso</p>	

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
libre ya que se debe realizar una	
revisión exhaustiva de los estudios.	

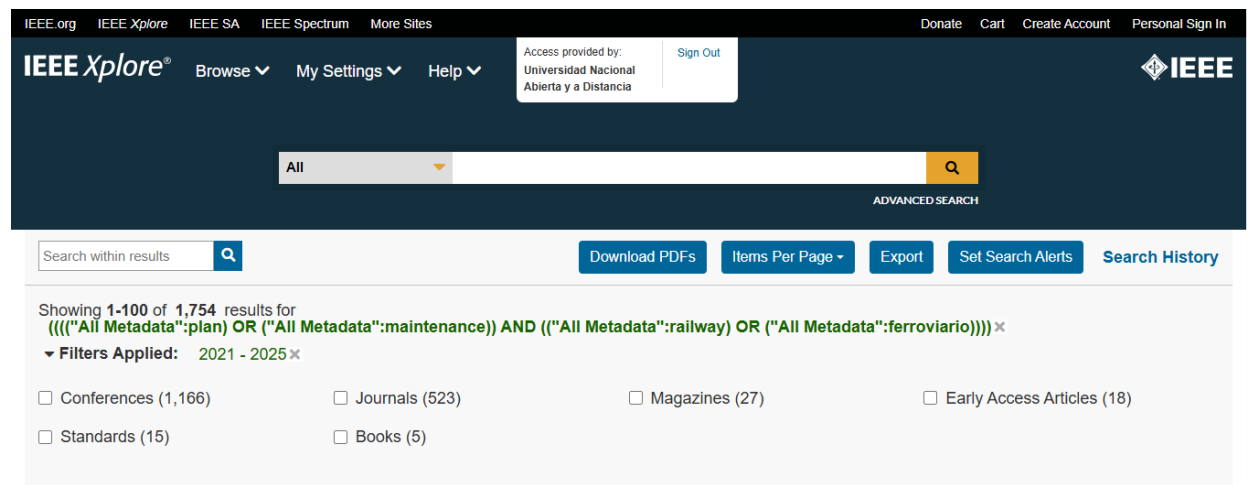
*Nota.* La Tabla 2 enlista los criterios de inclusión y exclusión como parte de la revisión documental de la investigación.

### **Cadena de Búsqueda**

Para identificar los artículos pertinentes en este estudio se diseñó una ecuación de búsqueda que comprende las palabras claves seleccionadas exhaustivamente para capturar los trabajos relacionados al objetivo de la investigación teniendo en cuenta los criterios CI1 y CE2 para IEEE Xplore y CI1, CE2, CE4 y CI5 para Science Direct, como se evidencia en la Figura 2 y la Figura 3, donde se observa la aplicación y la selección de nuestra cadena de búsqueda en las bases de datos de IEEE Xplore y Science Direct respectivamente, más adelante se consignan los diferentes resultados obtenidos luego de la exploración en las BD (Bases de Datos) en la Tabla 3 y la Tabla 4 respectivamente, esto para dar claridad sobre los valores obtenidos luego de aplicar el primer filtro compuesto por el CI1 y el CE2 en IEEE Xplore y el CI1, CE2, CE4 y CI5 en Science Direct.

## Figura 2

*Aplicación de la Ecuación de Búsqueda en IEEE Xplore donde Aplicamos el Criterio de Exclusión CE2*



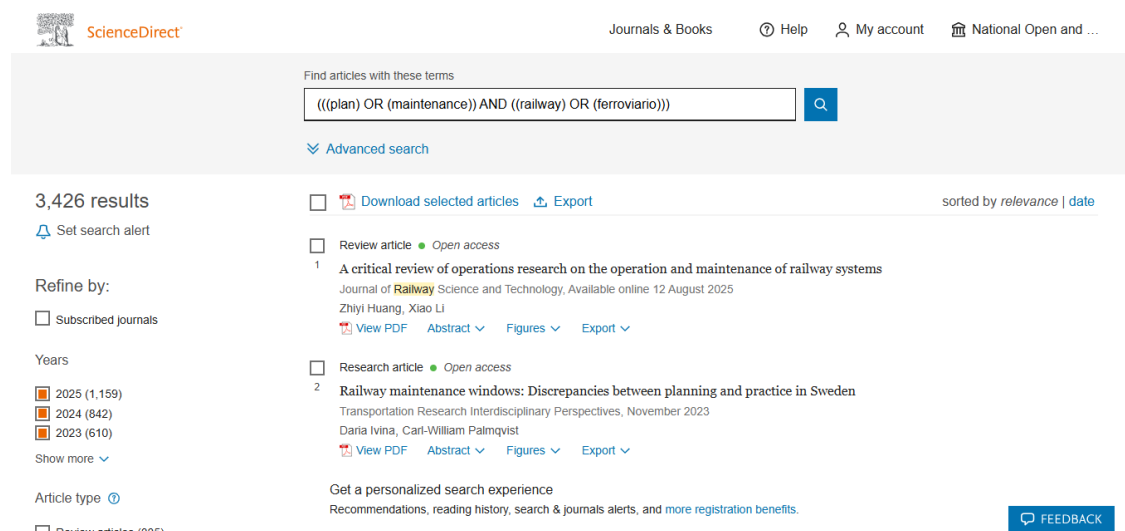
The screenshot shows the IEEE Xplore search interface. At the top, there are navigation links for IEEE.org, IEEE Xplore, IEEE SA, IEEE Spectrum, and More Sites. A search bar contains the query: `((("All Metadata":plan) OR ("All Metadata":maintenance)) AND (("All Metadata":railway) OR ("All Metadata":ferroviario))))`. Below the search bar, there are buttons for "Download PDFs", "Items Per Page", "Export", "Set Search Alerts", and "Search History". The search results section shows "Showing 1-100 of 1,754 results for" and "Filters Applied: 2021 - 2025". A list of filters is displayed with checkboxes:

- Conferences (1,166)
- Journals (523)
- Magazines (27)
- Early Access Articles (18)
- Standards (15)
- Books (5)

*Nota.* Captura de Pantalla en IEEE Explore.

## Figura 3

*Aplicación de la Ecuación de Búsqueda en Science Direct donde Aplicamos el Criterio de Exclusión CE2, CE4 y CI5*



The screenshot shows the Science Direct search interface. At the top, there are navigation links for Journals & Books, Help, My account, and National Open and ... The search bar contains the query: `((plan) OR (maintenance)) AND ((railway) OR (ferroviario))`. Below the search bar, there are buttons for "Download selected articles" and "Export". The search results section shows "3,426 results" and "sorted by relevance | date". A list of filters is displayed with checkboxes:

- Review article • Open access
- Research article • Open access

Two search results are visible:

- A critical review of operations research on the operation and maintenance of railway systems**  
Journal of **Railway** Science and Technology, Available online 12 August 2025  
Zhiyi Huang, Xiao Li  
[View PDF](#) [Abstract](#) [Figures](#) [Export](#)
- Railway maintenance windows: Discrepancies between planning and practice in Sweden**  
Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, November 2023  
Daria Ivina, Carl-William Palmqvist  
[View PDF](#) [Abstract](#) [Figures](#) [Export](#)

*Nota.* Captura de Pantalla en Science Direct.

**Tabla 3***Resultados de la Cadena de Búsqueda en IEEE Explore con CII*

Tipo de Documento	Resultados	Resultados CII
Conferences	1166	1166
Journals	523	523
Standards	15	15
Magazines	27	
Early Access Articles	18	
Books	5	
Total	1754	1704

*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de búsqueda en IEEE Explore, con primer filtro de Inclusión CII.

**Tabla 4***Resultados de la Cadena de Búsqueda en Science Direct con CII*

Tipo de Documento	Resultados	Resultados CII
Review Articles	335	335
Research Articles	2960	2960
Book Chapters	4	
Case Reports	53	
Conference Info	3	
Others	72	
Total	3427	3295

*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de búsqueda en Science Direct, con el primer filtro de Inclusión CII.

### **Resultados Etapas de Revisión**

En este capítulo presentaremos un resumen de las búsquedas iniciales en las bases de datos y los filtros realizados en la etapa de revisión y selección de artículos, que buscan garantizar la identificación específica de los artículos más relevantes que den respuesta al objetivo de la investigación:

*Filtro 1 Criterio CE3:* En este filtro aplicado a la exclusión se omiten aquellos estudios que no estén citados por otras personas o por otros investigadores, ya que se busca evaluar las soluciones con respaldo y reconocimiento en la comunidad científica, considerando un período de tiempo razonable para que los estudios sean evaluados y validados por otros investigadores antes de su implementación.

*Filtro 2 Criterio CE1:* En este filtro se excluyen los artículos de menos de 10 páginas, debido a que deben ser tenidos en cuenta estudios con alto detalle y profundidad.

*Filtro 3 Criterios CE1, CI3 y CI4:* En esta etapa, de carácter más aplicado, se permitió únicamente la selección de estudios directamente relacionados con implementaciones de mantenimiento ferroviario en cualquier sistema perteneciente a la infraestructura ferroviaria. Para ello, se realizó un análisis detallado de los artículos restantes a partir de su Título, Resumen y Palabras Clave, apoyándose en tablas de Microsoft Excel en formato CSV y complementando este proceso con una revisión manual del contenido.

De esta manera, solo se asociaron aquellos estudios en los que los términos de la cadena de búsqueda estuvieran presentes tanto en el título como en el cuerpo del artículo y que el objeto

principal del mismo estuviese relacionado directamente con el área de esta investigación.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis exhaustivo para garantizar que únicamente se incluyeran investigaciones estrictamente vinculadas a la ingeniería del transporte ferroviario.

*Filtro 4 Duplicidad de Artículos:* Por último, una vez identificados los artículos más relevantes e importantes para la investigación, se procede a verificar la posible duplicidad de documentos entre las bases de datos IEEE Xplore y Science Direct. Este paso permite asegurar que no existan estudios repetidos y garantizar la integridad y originalidad del conjunto final de referencias seleccionadas.

Finalmente, la selección de artículos a estudiar se acotó en con respecto a los resultados de búsqueda inicial como se consolida en la Tabla 5, lo que permitió obtener una base documental sólida, altamente relevante y respaldada por evidencia científica.

**Tabla 5**

*Resumen Resultados de Revisión por Filtros de Inclusión y Exclusión para cada Base de Datos.*

Base de Datos	Resultados	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
	Iniciales				
IEEE Xplore	1754	889	329	25	25
Base de Datos	Resultados	Filtro 3	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 4
	Iniciales				
Science	3295	28	22	20	20
Direct					
Total	5049	917	351	45	45

*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de la revisión realizada por filtros de inclusión y exclusión.

Luego de la revisión documental realizada, se logró identificar una característica diferenciadora entre las bases de datos IEEE Xplore y ScienceDirect. Debido a la naturaleza y al volumen de información que ofrece cada una, fue necesario aplicar estrategias de filtrado diferenciadas, con el fin de optimizar el proceso de búsqueda y reducir la gran cantidad de resultados arrojados, especialmente en el caso de ScienceDirect en comparación con IEEE Xplore.

Desde un análisis de tipo cuantitativo, se pudo determinar que, tras la aplicación del Filtro 3 en ambas bases de datos, la reducción del número de estudios y artículos fue significativamente alta. Este resultado evidencia que una parte considerable de los documentos inicialmente recuperados no presenta una asociación directa con los ítems establecidos en dicho filtro, particularmente aquellos relacionados con el mantenimiento ferroviario.

Como resultado del proceso de depuración y análisis, fue posible sintetizar la búsqueda en un total de 45 artículos de alta relevancia científica, enfocados en el ámbito ferroviario, el mantenimiento y las diferentes infraestructuras asociadas. Estos estudios constituyen la base fundamental para el desarrollo del capítulo siguiente, en el cual se presenta la síntesis del estado del arte que sustenta la presente monografía.

## Estado del Arte

### **Evolución del Mantenimiento Ferroviario y su Relación con la Ingeniería Electrónica**

La industria ferroviaria ha experimentado en las últimas décadas una transformación profunda en la forma en que se conciben y gestionan las actividades de mantenimiento. Históricamente, los sistemas ferroviarios se apoyaban en enfoques correctivos y preventivos tradicionales, sustentados principalmente en inspecciones periódicas y en la experiencia operativa del personal técnico. Sin embargo, el incremento en la complejidad tecnológica de los sistemas ferroviarios modernos -especialmente en lo relacionado con la electrónica, la automatización y las telecomunicaciones- ha impulsado la necesidad de metodologías de mantenimiento más estructuradas, predictivas y basadas en datos

Desde la ingeniería electrónica, el mantenimiento ferroviario adquiere una dimensión estratégica, dado que los sistemas actuales integran plataformas SCADA, redes de sensores distribuidos, sistemas telemétricos embarcados y Wayside, control de tracción y electrificación, protección automática de trenes (ATP), sistemas de detección y control de incendios, así como infraestructuras de comunicaciones críticas. La correcta operación de estos subsistemas depende directamente de la disponibilidad, confiabilidad y trazabilidad de los procesos de mantenimiento, lo que refuerza la necesidad de enfoques metodológicos unificados y normalizados.

En este contexto, Sedghi et al. (2021) presentan una taxonomía del mantenimiento ferroviario que evidencia la transición hacia modelos basados en confiabilidad, riesgo y optimización, destacando la fragmentación existente entre distintos enfoques y sistemas. Esta fragmentación representa uno de los principales desafíos para la gestión integral del mantenimiento, especialmente en infraestructuras ferroviarias complejas, donde la interacción entre subsistemas electrónicos, eléctricos, mecánicos y civiles es permanente.

## **Planificación y Optimización del Mantenimiento Bajo Incertidumbre**

Uno de los principales ejes del estado del arte se centra en la planificación del mantenimiento considerando la incertidumbre inherente a los procesos de degradación y fallo. Arcieri et al. (2023) proponen un enfoque robusto que combina procesos de decisión de Markov parcialmente observables (POMDP) con modelos bayesianos, permitiendo optimizar estrategias de mantenimiento incluso cuando existe incertidumbre en los modelos de degradación. Este tipo de aproximaciones resulta especialmente relevante en el entorno ferroviario, donde no siempre se dispone de información completa o precisa sobre el estado real de los activos.

De manera complementaria, Lin et al. (2022) desarrollan modelos de mantenimiento basado en condición para sistemas de alimentación de potencia de tracción, mientras que Lin et al. (2023) abordan la optimización de la asignación de recursos de mantenimiento en sistemas de catenaria electrificada. Estos trabajos evidencian la necesidad de coordinar recursos técnicos, ventanas de mantenimiento y criticidad de activos, aspectos que solo pueden gestionarse adecuadamente mediante planes de mantenimiento integrados y unificados.

Otros estudios, como los de Consilvio et al. (2021), Petchrompo et al. (2024), Sun et al. (2024) y Zhang H. et al. (2024), profundizan en la planificación predictiva y multiobjetivo del mantenimiento, considerando factores como el riesgo de interrupción del servicio, el consumo energético, el impacto ambiental y los costos del ciclo de vida. En conjunto, estos trabajos refuerzan la idea de que el mantenimiento ferroviario debe ser entendido como un proceso dinámico, interconectado con la operación y la planificación estratégica del sistema de transporte.

## **Mantenimiento Predictivo y Monitoreo Inteligente de Condición**

El mantenimiento predictivo constituye uno de los pilares fundamentales del mantenimiento ferroviario moderno y un campo de aplicación directa de la ingeniería electrónica. Binder et al. (2023) presentan una revisión sistemática del mantenimiento predictivo en el dominio ferroviario, identificando arquitecturas, técnicas y desafíos asociados al uso de sensores, sistemas de adquisición de datos y algoritmos de análisis avanzado.

Shimizu et al. (2023) proponen esquemas de pronóstico y gestión de salud de activos (PHM) que no requieren datos de fallo total, lo cual resulta particularmente útil en sistemas críticos donde los fallos catastróficos son poco frecuentes, pero altamente costosos. De manera similar, Wang Z. et al. (2024) desarrollan una estrategia de mantenimiento predictivo basada en la estimación de la vida útil remanente de un giroscopio ferroviario, demostrando el potencial de estos enfoques para componentes electrónicos y de control.

El monitoreo de condición se apoya cada vez más en sistemas de sensorización distribuidos y energéticamente autónomos. Li P. et al. (2021) proponen el uso de recolección de energía por radiofrecuencia (RF) para sistemas de monitoreo de vía sin baterías, reduciendo la necesidad de mantenimiento de los propios sistemas de medición. Estos desarrollos refuerzan la viabilidad de infraestructuras ferroviarias altamente instrumentadas y conectadas, alineadas con los principios del Internet de las Cosas (IoT).

## **Visión Artificial, Inteligencia Artificial y Diagnóstico Automatizado**

La incorporación de inteligencia artificial y técnicas de aprendizaje profundo ha permitido automatizar procesos de inspección y diagnóstico en el mantenimiento ferroviario. Donato et al. (2022) realizan un amplio estudio sobre la detección de defectos mediante sistemas de audio y video basados en deep learning, aplicados a distintos elementos ferroviarios. De

forma complementaria, Yang T. et al. (2023), Mei et al. (2025) y Zheng et al. (2025) desarrollan arquitecturas avanzadas para la detección automática de anomalías en carrocerías, componentes de vía y sistemas preventivos de mantenimiento.

En el ámbito del monitoreo de ruedas y ejes, Shaikh et al. (2023) presentan una revisión exhaustiva de sistemas Wayside, mientras que Fernandez-Bobadilla y Martin (2023) analizan tendencias en el monitoreo embarcado del estado de la vía. Estas investigaciones evidencian que el diagnóstico automatizado se ha convertido en un componente esencial de los planes de mantenimiento modernos, reduciendo la dependencia de inspecciones manuales y mejorando la precisión de las decisiones técnicas.

### **Gemelos Digitales, Big Data y Sistemas SCADA en el Mantenimiento Ferroviario**

La noción de gemelo digital emerge como una herramienta clave para integrar monitoreo, simulación y toma de decisiones. Guan et al. (2024) describen tecnologías para gemelos digitales de redes inalámbricas aplicadas a ferrocarriles inteligentes, mientras que Padovano et al. (2024) y Torzoni et al. (2024) desarrollan marcos de gemelos digitales para estaciones ferroviarias y estructuras civiles, respectivamente.

Estos enfoques permiten simular escenarios de fallo, evaluar estrategias de mantenimiento y analizar el impacto de las decisiones sobre la operación. Desde la ingeniería electrónica, los gemelos digitales se apoyan en datos provenientes de sistemas SCADA, telemetría y sensores inteligentes, lo que refuerza la necesidad de planes de mantenimiento unificados que aseguren coherencia, trazabilidad y calidad de la información.

### **Infraestructura Ferroviaria, Degradación y Sostenibilidad**

Diversos estudios se enfocan en la degradación física de la infraestructura y su relación con el mantenimiento. Bressi et al. (2021) optimizan estrategias de mantenimiento del lecho de

vía mediante modelos probabilísticos, mientras que Ramos et al. (2024) emplean modelos de aprendizaje automático para predecir deformaciones permanentes. Koohmishi et al. (2024) integran GPR, InSAR y machine learning para la gestión avanzada de activos de vía, y Poyyamozhi et al. (2024) proponen estrategias basadas en sensado ultrasónico y de humedad en tiempo real.

En el ámbito estructural, Castellani et al. (2025) utilizan UAVs para evaluar deformaciones en puentes ferroviarios, y Edjeou et al. (2025) analizan la rugosidad del riel posterior al esmerilado. Estos trabajos muestran que el mantenimiento debe considerar tanto variables estructurales como ambientales, alineándose con criterios de sostenibilidad y eficiencia energética (Damián & Zamorano, 2022; Jiang et al., 2024).

### **Integración del Mantenimiento Con la Operación Ferroviaria**

La literatura reciente enfatiza la necesidad de integrar el mantenimiento con la planificación operativa. Ivina y Palmqvist (2023) evidencian discrepancias entre la planificación de ventanas de mantenimiento y la operación real. Yang H. et al. (2024) y Yang W. et al. (2025) proponen modelos integrados que coordinan mantenimiento, horarios y reprogramación mediante técnicas avanzadas de optimización y aprendizaje por refuerzo.

Asimismo, Wang J. et al. (2022), Shi et al. (2024) y Li S. et al. (2022) demuestran que la planificación del mantenimiento, la gestión de depósitos y la operación de líneas ferroviarias deben abordarse de forma conjunta, reforzando la necesidad de metodologías unificadas.

### **Síntesis del Estado del Arte y Relación con la Propuesta Metodológica**

El análisis conjunto de los 45 artículos seleccionados pone de manifiesto avances significativos en metodologías, tecnologías y herramientas aplicadas al mantenimiento ferroviario. Sin embargo, también evidencia una fragmentación persistente en los enfoques,

donde la mayoría de las investigaciones se centran en componentes o subsistemas específicos, como rieles, ruedas, puentes o sistemas eléctricos, sin una integración metodológica global.

Esta fragmentación representa una oportunidad de mejora clara y justifica plenamente el desarrollo de la presente monografía, cuyo objetivo es proponer una metodología unificada para la estructuración de planes de mantenimiento en la infraestructura ferroviaria, integrando el estado del arte y las buenas prácticas identificadas. De este modo, el estado del arte no solo cumple una función descriptiva, sino que actúa como fundamento crítico para la propuesta metodológica desarrollada en los capítulos siguientes.

En los capítulos siguientes de la propuesta metodológica se abordarán las bases normativas y científicas que sustentan la creación y estructuración de planes de mantenimiento en el ámbito ferroviario. Asimismo, se analizarán ejemplos de integración de dichos planes, junto con los principales indicadores técnicos utilizados para orientar el mantenimiento hacia la confiabilidad, la eficiencia operativa y la aplicación de buenas prácticas reconocidas en el sector.

De igual manera, se estudiará cómo distintas empresas vinculadas al entorno ferroviario implementan metodologías de unificación de criterios en la gestión del mantenimiento, permitiendo globalizar las actuaciones, estandarizar procesos y consolidar sistemas unificados de reacción y mantenimiento. Este enfoque busca optimizar los procesos de gestión, reducir la dispersión de criterios técnicos y minimizar el impacto de las intervenciones sobre el flujo del transporte ferroviario, garantizando que las afectaciones se mantengan dentro de los márgenes previamente planificados en los procesos de gestión del mantenimiento.

## **Propuesta Metodológica**

La siguiente propuesta metodológica adopta un enfoque de carácter aplicado, descriptivo y documental, orientado a la formulación de una estructura metodológica para la creación de planes de mantenimiento unificados en la infraestructura ferroviaria. El estudio se desarrolla bajo un enfoque mixto, integrando técnicas cualitativas (análisis de la normatividad, revisión documental con planes de mantenimiento de ejemplo y estudio de manuales técnicos, manuales descriptivos y esquemas de mantenimiento) con componentes cuantitativos (definición de algunos indicadores, frecuencias de mantenimiento, gestión de herramientas y personal y criterios de criticidad).

### **Revisión de la Normativa**

En este espacio se realizará un análisis documental de fuentes normativas en mantenimiento ferroviario, esto con el fin de establecer criterios que determinen una base para el estudio y la estructuración metodológica de un plan de mantenimiento, entre estas normatividades se mencionan las siguientes:

- Normativas internacionales las cuales permiten tener bases internacionales que determinan directrices para la ejecución de los mantenimientos en la infraestructura ferroviaria (NFPA, UNE-EN, ISO, PAS, UIC, ASHRAE).
- Manuales de fabricantes y operadores, los cuales son diseñados como manuales descriptivos de elementos, de subsistemas, fichas técnicas y manuales de mantenimiento propios de cada uno de estos elementos (CAF, Siemens, Alstom, Bombardier, Cisco, Tecliven.).
- Experiencias prácticas, como algunos planes de mantenimiento del Metro de Quito creados en GMQ empresa para la cual yo fui consultor técnico en mantenimiento

ferroviario, Estos planes constituyen referentes prácticos de organización y planificación del mantenimiento preventivo en todos los sistemas de la infraestructura ferroviaria

Este análisis permitirá identificar las mejores prácticas, lineamientos técnicos y tendencias actuales en gestión de activos ferroviarios.

### ***Normativa Internacional***

**NFPA (National Fire Protection Association).** La Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) es una organización internacional que fue fundada en 1896, con el objetivo de desarrollar y promover normas para la protección contra incendios. Estas normas se han convertido en un referente mundial para garantizar la seguridad de las personas, las propiedades y el medio ambiente ante riesgos relacionados con el fuego. A lo largo de los años, la NFPA ha elaborado códigos y estándares que cubren una amplia gama de aplicaciones, desde el almacenamiento de materiales peligrosos hasta el diseño de sistemas de rociadores automáticos.

***Uso de NFPA en Europa y América Latina.*** Aunque Europa cuenta con su propio conjunto de normas, como las normas UNE-EN, cada vez es más frecuente que se utilicen las normas NFPA en proyectos específicos. Esto se debe a que las normas NFPA permiten abordar una mayor variedad de riesgos y situaciones no contempladas en las normativas europeas, lo que resulta esencial para ciertos tipos de edificaciones o instalaciones con riesgos específicos.

Por ejemplo, en América Latina, debido a la gran cantidad de incendios industriales y urbanos que han ocasionado pérdidas significativas, países como México, Chile y Colombia han comenzado a aplicar las normas NFPA en sus regulaciones de protección contra incendios.

**Importancia de la NFPA.** Según Tecnosinergia (2016). Las normas de la NFPA son utilizadas en todo el mundo por:

- Ingenieros y diseñadores para la planificación de sistemas de protección contra incendios.
- Empresas y propietarios para garantizar la seguridad en sus edificaciones.
- Bomberos y equipos de emergencia para mejorar sus protocolos de respuesta.
- Gobiernos y organismos reguladores para desarrollar leyes y reglamentos de seguridad.

**Principales Normas de la NFPA.** La NFPA ha publicado más de 300 normas y códigos que cubren una amplia variedad de temas relacionados con la seguridad contra incendios y la protección humana. Algunas de las más relevantes incluyen (Tecnosinergia, 2016):

- NFPA 1 – Código de Incendios: Establece los requisitos generales para la prevención y control de incendios en edificios e instalaciones. (NFPA, s.f.)
- NFPA 10 – Extintores Portátiles: Regula la selección, ubicación, inspección, mantenimiento y uso de extintores contra incendios. (NFPA, s.f.)
- NFPA 13 – Sistemas de Rociadores Automáticos: Define los criterios para el diseño e instalación de sistemas de rociadores contra incendios. (NFPA, s.f.)
- NFPA 14 – Sistemas de Mangueras y Conexiones de Bomberos: Especifica los requisitos para la instalación de sistemas de tuberías verticales y estaciones de mangueras en edificios. (NFPA, s.f.)
- NFPA 20 – Bombas Contra Incendios: Regula el diseño, instalación y operación de bombas utilizadas en sistemas de protección contra incendios. (NFPA, s.f.)

- NFPA 25 – Mantenimiento de Sistemas de Protección Contra Incendios: Establece los procedimientos de inspección, prueba y mantenimiento de sistemas como rociadores y tuberías verticales. (NFPA, s.f.)
- NFPA 72 – Código Nacional de Alarmas de Incendio: Define los requisitos para los sistemas de detección, alarmas y notificación de emergencias. (NFPA, s.f.)
- NFPA 2001 – Sistemas de Extinción con Agentes Limpios: Cubre los requisitos para la protección de incendios mediante agentes gaseosos que no dañan equipos electrónicos o documentos sensibles. (NFPA, s.f.)
- NFPA 130 – Norma para sistemas de tránsito y ferrocarriles de pasajeros con guías fijas. Esta norma especifica los requisitos de protección contra incendios y seguridad humana para los sistemas de tránsito sobre rieles fijos y sistemas de transporte ferroviario de pasajeros subterráneos, de superficie y elevados. (NFPA, s.f.)

En el marco de esta investigación se abordará la NFPA 130, normativa específica que regula los sistemas de protección contra incendios en infraestructuras ferroviarias. Cuando se realizan los diseños para la creación de los sistemas PCI en cualquier infraestructura ferroviaria, se deben basar las especificaciones y diseños en esta normatividad, también se debe incluir a manera de plan de mantenimiento la norma NFPA 25 la cual está definida dentro del marco del mantenimiento de los sistemas de protección contra incendios.

*NFPA 130 y NFPA 25 en el Mantenimiento de Infraestructuras PCI.* La aplicación de normas internacionales en la gestión del mantenimiento ferroviario resulta indispensable para garantizar la seguridad operativa y la protección de los usuarios. En este contexto, las normas NFPA 130 y NFPA 25 adquieren un papel central al establecer directrices específicas para la planificación, inspección y mantenimiento de los sistemas de protección contra incendios (PCI) en infraestructuras ferroviarias.

La NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, establece los requisitos de seguridad contra incendios y protección humana en sistemas ferroviarios subterráneos, de superficie y elevados, cubriendo aspectos como diseño, instalación, ventilación de emergencia, rutas de evacuación y equipamiento PCI. Esta norma constituye una referencia fundamental para la planificación de medidas preventivas y de contingencia en infraestructuras ferroviarias de gran escala (NFPA, s.f.).

Por su parte, la NFPA 25, Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems, regula los procedimientos de inspección, prueba y mantenimiento de sistemas PCI tales como rociadores automáticos, tuberías verticales, mangueras y válvulas de control. Su implementación asegura que los sistemas de extinción se mantengan en condiciones óptimas de funcionamiento, reduciendo significativamente el riesgo de fallas durante una emergencia (Tecnosinergia, 2016).

El valor de ambas normativas radica en su complementariedad: mientras la NFPA 130 define el marco de diseño y seguridad en el ámbito ferroviario, la NFPA 25 garantiza la operación confiable de los sistemas PCI mediante programas de mantenimiento estructurados. De esta forma, la integración de estas normas en la elaboración de planes de mantenimiento permite alinear la operación ferroviaria con estándares internacionales de seguridad, asegurando

tanto la protección de los usuarios como la sostenibilidad de la infraestructura (TecnitexFire, 2022).

En consecuencia, basar los planes de mantenimiento en estas normativas no solo ofrece un respaldo técnico-normativo, sino que también contribuye a la creación de un sistema de gestión de mantenimiento preventivo y correctivo estandarizado, aplicable a diferentes contextos ferroviarios en América Latina y el mundo.

**EN (European Norms) y UNE (Una Norma Española).** Las normas EN son Normas Europeas, que elaboran, proponen y desarrollan los expertos de los diferentes Estados Miembros, de los sectores industriales o tecnológicos dentro de la estructura de normalización del Comité Europeo de Normalización (CEN). Siguen el mismo proceso de tramitación que una norma UNE, pero a nivel Europa. Tras el mismo, son editadas como normas EN.

AENOR es la Asociación Española de Normalización y Certificación cuyas funciones son

- Normaliza y certifica actividades de los sectores industriales y servicios.
- Elabora normas técnicas siempre en colaboración y consenso con los sectores industriales y servicios.
- Normaliza todas las normas que se refieren a cada actividad en concreto.
- Certifican la función de las empresas en cuanto a la producción de productos como en la prestación de los servicios.

Definimos las normas UNE como un conjunto unificado de normas técnicas creadas por los Comités Técnicos de Normalización o CTN (Vertiprotect, 2020).

En el contexto ferroviario europeo, las normas EN (European Norms) y UNE-EN (adaptación española de las EN publicadas por AENOR) constituyen un marco regulatorio

esencial para garantizar la seguridad, la estandarización y la fiabilidad en los procesos de operación y mantenimiento de los sistemas ferroviarios. A continuación, se describen las principales normas aplicables al ámbito del mantenimiento:

- La norma UNE-EN 17023:2019 establece directrices específicas para la creación y modificación de planes de mantenimiento en material rodante ferroviario. Esta norma promueve la trazabilidad, seguridad y fiabilidad en la planificación del mantenimiento, contemplando todo el ciclo de vida de los activos ferroviarios (AENOR, 2019). Su relevancia para la monografía radica en que constituye el pilar metodológico para el diseño de planes unificados, al establecer procedimientos que permiten documentar, actualizar y optimizar las actividades de mantenimiento en trenes y locomotoras.

- La norma UNE-EN 15313 se centra en el mantenimiento de ejes montados, tanto en servicio como fuera del vehículo. Este componente es crítico en la seguridad ferroviaria, pues un fallo en el eje puede derivar en accidentes graves. La norma define requisitos de inspección, mantenimiento y sustitución, lo cual facilita integrar procedimientos específicos en los planes de mantenimiento preventivo (CEN, 2016). Su aplicación asegura la prolongación de la vida útil de los ejes y la reducción de riesgos operativos.

- La UNE-EN 15085 regula el soldeo de vehículos ferroviarios y sus componentes. Aunque originalmente se centra en procesos de fabricación, su aplicación es clave en el ámbito de mantenimiento, especialmente en actividades de ciclo largo y rehabilitación estructural (CEN, 2007). Gracias a esta norma se definen criterios de inspección, reparación y certificación de soldaduras, asegurando la resistencia mecánica y la seguridad de los vehículos ferroviarios.

- La serie UNE-EN 14033 aborda la seguridad, el diseño y el mantenimiento de la maquinaria ferroviaria de vía, tales como bateadoras, niveladoras y perfiladoras. Estas máquinas

son fundamentales para la conservación de la infraestructura, y la norma fija los requisitos que deben cumplir para operar de manera segura y eficiente (CEN, 2017). En este sentido, los planes de mantenimiento que incluyan maquinaria de vía deben alinearse con esta normativa para garantizar fiabilidad y disponibilidad de los equipos.

- La norma EN 45545 regula la protección contra incendios en vehículos ferroviarios. Su enfoque está en los materiales, componentes y sistemas expuestos a riesgo de combustión, estableciendo parámetros de resistencia al fuego, propagación de llamas, emisión de humos y toxicidad de gases (CEN, 2013). Aunque no es una norma de mantenimiento directo, condiciona la selección, sustitución y control de materiales en los planes de mantenimiento, asegurando el cumplimiento de los requisitos de seguridad en sistemas de Protección Contra Incendios (PCI) en el sector ferroviario.

Las normas EN y UNE-EN descritas evidencian cómo la estandarización internacional permite consolidar criterios técnicos en el mantenimiento ferroviario. Cada norma aborda un subsistema específico —material rodante, componentes críticos, estructuras, maquinaria de vía o sistemas de seguridad— y, en conjunto, ofrecen un marco metodológico sólido para la creación de planes de mantenimiento unificados por sistemas funcionales. La integración de estas normas en la planificación contribuye a la seguridad operativa, la confiabilidad de los activos y la sostenibilidad del transporte ferroviario.

**Normas ISO.** La Organización Internacional de Normalización (ISO) fue fundada en 1947 y actualmente integra más de 160 organismos nacionales. Su misión es generar estándares internacionales que promuevan la seguridad, la interoperabilidad y la eficiencia en los sectores industriales, incluyendo el transporte ferroviario (ISO, 2020).

***Importancia de las Normas ISO.*** Las normas de la International Organization for Standardization (ISO) son un referente mundial en la estandarización de procesos industriales, aportando un marco común que facilita la interoperabilidad, la seguridad y la calidad en diversos sectores, incluido el ferroviario. Su importancia radica en que permiten unificar criterios técnicos a nivel internacional, promoviendo la eficiencia en los procesos de mantenimiento, la sostenibilidad en la gestión de activos y la reducción de riesgos operativos (ISO, 2020).

En el ámbito ferroviario, las normas ISO ofrecen herramientas para la planificación y el control de los sistemas de gestión de calidad, la administración del ciclo de vida de los activos y la implementación de metodologías que garantizan la confiabilidad de las operaciones. Esto contribuye a que los planes de mantenimiento se estructuren con una visión integral, que no solo aborde aspectos técnicos, sino también organizacionales y financieros, alineando la gestión ferroviaria con buenas prácticas globales (ISO, 2014).

***Normas ISO Asociadas en el Ámbito Ferroviario.***

- ISO 55000 / 55001 / 55002 – Gestión de activos: definen principios, requisitos y directrices para la implementación de programas de gestión y mantenimiento de activos, ampliamente aplicables en la infraestructura y el material rodante ferroviario.
- ISO/TS 22163:2017 – Sistemas de gestión de calidad en la industria ferroviaria: estándar basado en la norma ISO 9001, adaptado a las necesidades del sector ferroviario, anteriormente conocido como IRIS (International Railway Industry Standard).

- ISO 9001:2015 – Gestión de la calidad: norma transversal utilizada en talleres, empresas operadoras y proveedores de servicios ferroviarios para asegurar calidad en procesos de mantenimiento y reparación.
- ISO 15288:2015 – Ingeniería de sistemas. Ciclo de vida de los sistemas: aplicable al diseño, operación y mantenimiento de sistemas ferroviarios complejos, incluyendo señalización y telecomunicaciones.

**PAS (Publicly Available Specification).** Las PAS son especificaciones de carácter preliminar creadas principalmente por el British Standards Institution (BSI). Su objetivo es dar respuesta rápida a necesidades emergentes en sectores innovadores, antes de que se consoliden como normas internacionales (BSI, 2015).

***Importancia de las Normas PAS.*** Las Publicly Available Specifications (PAS) representan un instrumento normativo ágil, creado principalmente por el British Standards Institution (BSI), con el objetivo de dar respuesta rápida a necesidades emergentes en sectores industriales y tecnológicos. Su importancia radica en que permiten introducir lineamientos de buenas prácticas de manera más flexible que las normas ISO o EN, siendo útiles en contextos donde la innovación y la digitalización avanzan más rápido que la formalización de estándares (BSI, 2015).

En el ámbito ferroviario, las PAS se destacan por su contribución a la gestión de activos físicos y digitales, así como al desarrollo de metodologías de mantenimiento predictivo y herramientas de gestión BIM (Building Information Modeling) aplicadas a infraestructuras ferroviarias. De esta manera, ofrecen un marco de transición hacia normas internacionales consolidadas como las ISO 55000.

***Normas PAS Asociadas en el Ámbito Ferroviario.***

- PAS 55:2008 – Gestión de activos físicos: base conceptual y metodológica para programas de mantenimiento ferroviario, precursora de la serie ISO 55000.
- PAS 1192 (serie) – Building Information Modeling (BIM): aplicable en la digitalización de infraestructuras ferroviarias y en la trazabilidad de procesos de mantenimiento.

**UIC (Union Internationale des Chemins de fer).** La Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) fue fundada en 1922 y agrupa a empresas ferroviarias, operadores y fabricantes a nivel mundial. Sus normas, denominadas fichas UIC, constituyen un referente técnico global en interoperabilidad, seguridad y gestión de infraestructuras (UIC, 2018).

***Importancia de las Normas UIC.*** La Union Internationale des Chemins de fer (UIC) es una organización fundada en 1922 que agrupa a operadores y administradores ferroviarios a nivel mundial. Sus normas, conocidas como fichas UIC, son fundamentales porque representan el consenso técnico de los principales actores ferroviarios internacionales. Su importancia radica en que fomentan la interoperabilidad, seguridad y unificación de criterios técnicos en corredores ferroviarios internacionales (UIC, 2018).

En materia de mantenimiento, las fichas UIC aportan directrices prácticas para la gestión del ciclo de vida de componentes críticos como ejes, ruedas, bogies, sistemas de freno e infraestructura de vía. Esto las convierte en un complemento esencial a normas ISO y EN, aportando un enfoque más operativo y aplicado.

***Normas UIC Asociadas en el Ámbito Ferroviario.***

- UIC 510-2 – Condiciones técnicas de mantenimiento de ruedas y ejes.
- UIC 541-5 – Requisitos de mantenimiento y pruebas de sistemas de freno.

- UIC 712 – Directrices de mantenimiento de infraestructura de vía (carriles, traviesas y balasto).

- UIC 960 – Gestión del ciclo de vida del material rodante.

**ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).** La American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), fundada en 1894, es una organización técnica internacional que desarrolla normas en climatización, ventilación, eficiencia energética y calidad del aire. Aunque no está enfocada exclusivamente en el sector ferroviario, sus estándares tienen gran importancia en la operación de sistemas HVAC en túneles, estaciones y material rodante (ASHRAE, 2021).

***Importancia de las Normas ASHRAE.*** Su relevancia en el ámbito ferroviario radica en que garantizan condiciones seguras de ventilación y confort, además de establecer parámetros de eficiencia energética. En contextos de emergencia, como incendios en túneles o estaciones, las normas ASHRAE resultan fundamentales para el diseño y mantenimiento de sistemas de ventilación de emergencia, trabajando en conjunto con NFPA y EN.

***Normas ASHRAE Asociadas en el Ámbito Ferroviario.***

- ASHRAE 62.1 – Ventilación en espacios interiores, aplicable a estaciones y túneles ferroviarios.

- ASHRAE 90.1 – Eficiencia energética en sistemas HVAC de infraestructuras ferroviarias.

- ASHRAE 55 – Condiciones térmicas de confort humano en material rodante y estaciones.

- ASHRAE 129 – Ensayos de eficacia de ventilación en túneles y espacios confinados.

La revisión de las normativas internacionales (NFPA, EN/UNE-EN, ISO, PAS, UIC y ASHRAE) permitió evidenciar la existencia de un marco técnico sólido que orienta la estructuración de planes de mantenimiento ferroviario. Cada una de estas normas aporta lineamientos específicos en materia de seguridad, gestión de activos, interoperabilidad y eficiencia operativa, lo cual respalda la necesidad de unificar criterios en la gestión del mantenimiento de la infraestructura y el material rodante.

No obstante, la normatividad constituye únicamente la base de referencia regulatoria. Para complementar este marco, resulta indispensable considerar los manuales técnicos de fabricantes y operadores ferroviarios, los cuales proporcionan directrices prácticas y específicas para el mantenimiento de equipos, subsistemas y componentes. Estos documentos, en combinación con las normas internacionales, permiten elaborar planes de mantenimiento integrales que respondan tanto a los estándares globales como a las particularidades técnicas de cada sistema ferroviario.

### ***Manuales de Fabricantes y Operadores Ferroviarios***

Además de las normativas internacionales que constituyen el marco regulatorio de referencia, los manuales de fabricantes y operadores ferroviarios desempeñan un papel esencial en la gestión del mantenimiento. Estos documentos contienen instrucciones técnicas específicas sobre la instalación, operación, inspección, pruebas y sustitución de componentes y sistemas, adaptadas a las características de cada equipo o vehículo.

Su importancia radica en que trasladan las recomendaciones de diseño y fabricación a la práctica operativa, garantizando que las tareas de mantenimiento se ejecuten conforme a las condiciones reales de funcionamiento del material rodante, la infraestructura y los sistemas asociados. Asimismo, proporcionan los parámetros de seguridad, frecuencias de intervención,

herramientas requeridas y procedimientos estandarizados que deben ser aplicados por el personal técnico.

Entre los principales tipos de documentación destacan:

- Manuales descriptivos de elementos: especifican las características técnicas de cada equipo, incluyendo capacidades, dimensiones, materiales, diagramas y condiciones de operación.
- Manuales de subsistemas: recopilan información técnica de conjuntos funcionales (frenos, bogies, sistemas eléctricos, señalización, telecomunicaciones), explicando su integración y funcionamiento dentro del tren o de la infraestructura.
- Fichas técnicas: proporcionan datos puntuales sobre rendimiento, límites de operación, consumos y parámetros de seguridad, siendo útiles para inspecciones rápidas y verificaciones de mantenimiento.
- Manuales de mantenimiento: establecen las rutinas de inspección, limpieza, lubricación, pruebas, calibración y sustitución de piezas, junto con la periodicidad de cada actividad.

En el sector ferroviario, empresas como CAF (Empresa para la que trabajo actualmente), Siemens, Alstom, Bombardier, Cisco y Tecliven desarrollan manuales que acompañan la entrega de trenes, equipos de señalización, telecomunicaciones y sistemas auxiliares. Estos documentos no solo garantizan la correcta operación de los sistemas, sino que además sirven como guía indispensable para la estructuración de planes de mantenimiento ajustados a las recomendaciones de diseño y a la vida útil esperada de cada componente.

De esta manera, los manuales de fabricantes y operadores se convierten en la fuente primaria de información técnica para la elaboración de planes de mantenimiento. Su integración

con las normas internacionales (NFPA, EN/UNE-EN, ISO, PAS, UIC y ASHRAE) permite consolidar procedimientos estandarizados, seguros y alineados tanto con los estándares globales como con las particularidades técnicas de cada sistema ferroviario.

### ***Experiencias Practicas***

La revisión de experiencias prácticas constituye un elemento clave para complementar la normatividad y la documentación técnica de fabricantes. Haber estado en contacto directo con planes de mantenimiento elaborados y aplicados en el Metro de Quito y en el Metro de Medellín, así como con la gestión desarrollada por CAF como mantenedor de material rodante, ha permitido adquirir un conocimiento aplicado sobre la forma en que se estructuran, organizan y ejecutan dichos planes.

Estos planes no solo se limitan a listar actividades, sino que presentan una estructura metodológica clara, orientada a que cualquier operador, mantenedor o técnico ferroviario pueda comprender de manera sencilla:

- Las actividades paso a paso que deben realizarse en cada intervención.
- Los elementos, herramientas e insumos necesarios para llevar a cabo dichas tareas.
- Las directrices de seguridad y de operación que deben observarse en cada proceso.
- Las tareas de metrología para garantizar la precisión en las mediciones, pruebas y calibraciones.
- Los criterios de inspección y sustitución de componentes críticos.
- Las frecuencias de mantenimiento, definidas en función de kilometraje, tiempo de operación o condiciones de servicio.

- El objetivo de cada actividad, alineado con la búsqueda de confiabilidad, disponibilidad y seguridad en los sistemas ferroviarios.

**Metro de Quito, Consorcio Gerencia Metro de Quito (GMQ).** En el caso del Metro de Quito, los planes creados en la Gerencia Metro de Quito (GMQ) constituyen un referente de planificación preventiva integral, abarcando todos los subsistemas de infraestructura y material rodante. En el Metro de Medellín, la aplicación de planes de mantenimiento para flotas CAF ha permitido observar cómo la gestión de ciclo largo y la modernización de trenes requieren un equilibrio entre las recomendaciones de fabricante y la experiencia operativa acumulada por los equipos locales.

Estas experiencias permiten destacar que la verdadera utilidad de un plan de mantenimiento no radica únicamente en su diseño documental, sino en su capacidad de convertirse en una guía operativa estandarizada, comprensible y aplicable en campo por los diferentes actores del sistema ferroviario. En este sentido, la interacción con estos planes ha facilitado la comprensión profunda de sus estructuras, confirmando que la combinación de normatividad, manuales de fabricante y práctica operativa es esencial para alcanzar altos niveles de confiabilidad y seguridad en el transporte ferroviario.

Los planes de mantenimiento en infraestructuras ferroviarias suelen responder a un esquema estructurado, el cual se describe de manera general en este apartado, para ser desarrollado con mayor profundidad en la fase de validación de la propuesta. Es importante resaltar, dentro de esta revisión del estado del arte, que cada manual de mantenimiento tiene como propósito fundamental apoyarse en la normativa vigente, agrupar la información contenida en los manuales técnicos y descriptivos de los diferentes elementos, incorporar las

recomendaciones de operación, inspección y mantenimiento de los fabricantes, así como definir las frecuencias y las horas operativas que deben cumplirse entre cada intervención.

Teniendo en cuenta lo anterior, la mayoría de los planes de mantenimiento ferroviario presentan una estructura común, que integra objetivos, directrices, actividades técnicas, criterios de inspección y parámetros de seguridad, todos ellos orientados a garantizar la confiabilidad, la disponibilidad y la seguridad de los sistemas ferroviarios. Esta estructura está representada de la siguiente forma, para este ejemplo utilizaremos el plan de mantenimiento de Instalaciones de climatización en el Metro de Quito creado por la Gerencia Metro de Quito (GMQ). El cual esta descrito en la Figura 4.

#### Figura 4

*Índice Plan de Mantenimiento Climatización.*



#### ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	DESCRIPCIÓN GENERAL Y OBJETO.....	4
2.1	DOTACIÓN DE EQUIPOS.....	5
3	TRABAJOS DE MANTENIMIENTO.....	10
3.1	MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	10
3.2	MANTENIMIENTO CORRECTIVO.....	14
4	DEDICACIONES MANTENIMIENTO INSTALACIÓN CLIMATIZACIÓN.....	15
4.1	EQUIPO DE MANTENIMIENTO.....	15
4.2	DEDICACIÓN POR ESTACIÓN.....	16
5	REPUESTOS.....	18
ANEXO 1. PLANOS DE CLIMATIZACIÓN		
1.1	PLANOS DE CLIMATIZACIÓN EN ESTACIONES	
1.2	PLANOS DE CLIMATIZACIÓN EN TALLERES Y COCHERAS	
ANEXO 2. FICHAS TÉCNICAS SUMINISTRADAS POR EL INSTALADOR		
ANEXO 3. PROTOCOLOS DE INSTALACIÓN SUMINISTRADOS POR EL INSTALADOR		
ANEXO 4. MANUAL DE MANTENIMIENTO CLIMA. ENCLAV, COM Y C.C.I. SUMINISTRADO POR EL INSTALADOR		

*Nota:* Ejemplo del índice general del plan de mantenimiento de climatización en el metro de Quito. Tomado del plan de Mantenimiento de Climatización del Metro de Quito, 2024.

Algo muy importante a destacar es que en los planes siempre hay una introducción la cual presenta el contexto general del plan de mantenimiento: objetivos, alcance y justificación. Aquí se explica la importancia del sistema a intervenir y el propósito de establecer procedimientos claros para garantizar seguridad y confiabilidad. Luego se detalla la descripción general y objeto específica el sistema a tratar, sus funciones principales y el objeto del mantenimiento, es decir, asegurar su correcto funcionamiento y prolongar su vida útil. Continuamos con la dotación de equipos que representa una lista tipo inventario de lo que se tienen como elementos que hacen parte del sistema de climatización, este tipo de inventario se detalla en la Figura 5.

### Figura 5

#### *Ejemplo de Lista de Inventario de Equipos*

##### RELACIÓN DE EQUIPOS AIRE ACONDICIONADO EN CUARTOS DE ENCLAVAMIENTO

UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN DE EQUIPO	FABRICANTE	MODELO	Nº SERIE
TALLERES Y COCHERAS	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5598
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5599
ESTACIÓN QUITUMBE	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5592
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5593
ESTACIÓN SOLANDA	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5596
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5597
ESTACIÓN EL RECREO	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5588
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5589
ESTACIÓN LA MAGDALENA	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5590
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5591
ESTACIÓN SAN FRANCISCO	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5594
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5595
ESTACIÓN UNIVERSIDAD CENTRAL	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5600
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5601
ESTACIÓN LA CAROLINA	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5602
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5603
ESTACIÓN EL LABRADOR	UNIDAD INTERIOR	DATA	CRVF-050XDSM2ALUF	DE2010-5604
	UNIDAD EXTERIOR	DATA	TCH4-060NW3AL	DE2010-5605

*Nota.* Se anexa un ejemplo de cómo es el inventario de equipos en el sistema de climatización.

Tomado del plan de Mantenimiento de Climatización del Metro de Quito, 2024.

Se menciona, además, una descripción de clara de los mantenimientos que se pueden ejecutar en el sistema, haciendo énfasis en el mantenimiento preventivo y correctivo. También se menciona en el índice el apartado dedicación del mantenimiento el cual refleja la cantidad de personas, los equipos a utilizar, las herramientas, las frecuencias de mantenimiento por estación y por grupo de cuarto técnico climatizado y por último se anexa una lista de repuestos a considerar tener como mínimo para la solvencia y la integridad de los equipos ya que se considera el equipo de climatización como un elemento crítico en los cuartos técnicos de telecomunicaciones para su buen funcionamiento.

Además, como parte fundamental de los planes de mantenimiento creados, se incluyen anexos destinados a cualquier persona interesada en conocer el sistema, ya sea desde la perspectiva de la operación o de la gestión del mantenimiento. Estos anexos constituyen un complemento esencial y reúnen los elementos descritos en este estudio del arte.

En este caso particular, se dispone de:

- Planos arquitectónicos de las estaciones, donde se identifican los equipos a intervenir y su ubicación dentro de la infraestructura.
- Fichas técnicas de los equipos suministradas por el proveedor, en las que se especifican la marca, referencia y características técnicas de los componentes instalados.
- Protocolos de instalación, que documentan las pruebas de puesta en marcha de los equipos al inicio de su operación, incluyendo parámetros como presiones de trabajo y evidencias fotográficas del estado de la instalación.
- Manual de mantenimiento recomendado por el fabricante y el suministrador, en el que se definen rutinas de mantenimiento para los sistemas de climatización.

No obstante, es importante resaltar que, aunque estos documentos son indispensables, no resultan suficientes por sí solos. En el contexto de la infraestructura ferroviaria es necesaria la unificación de estos elementos en un plan de mantenimiento integral, que permita consolidar las actividades generales en un único manual, garantizando trazabilidad, estandarización y eficiencia en la gestión del mantenimiento.

**CAF (Construcciones y Auxiliares Ferroviarios) Colombia SAS.** En el caso de la experiencia obtenida con planes de mantenimiento de material rodante con vehículos tipo tren de pasajeros, la estructura tiene diferencias con los de Metro de Quito ya que como solo es dedicado al tren es un plan sé que divide en sistemas elementos de tren y ya a partir de ahí se definen diferentes criterios como lo son los manuales descriptivos de sistemas, los planes de mantenimiento de cada elemento, los catálogos de piezas de cada sistema, y las bases de datos de fabricación protocolos manuales de fabricantes y equipos de pruebas y útiles de mantenimiento necesarios para la ejecución de un mantenimiento.

Aquí como técnico de mantenimiento y luego como supervisor de línea de mantenimiento he podido evidenciar en los dos ámbitos del mantenimiento como los manuales de mantenimiento de CAF también conservan el mismo criterio metodológico en el que fundamentamos nuestra monografía, un sistema unificado de varios fabricantes y de varios equipos para mantener un tren, esto nos lleva a comprender y ver que los mantenimientos tienen un orden cronológico, una base de tiempo o de kilometraje para ejecutar rutinas, y así realizar seguimiento continuo de las ejecuciones de mantenimiento, todo basado en la confiabilidad. Los planes por tanto se estructuran en visitas de seguridad, mantenimientos medios, revisiones intermedias y revisiones generales, esto delimitado por unos kilometrajes definidos en rangos de 100 km hasta 1000000 km que representa la revisión general.

En este comparativo mostraremos como se estructura el plan de mantenimiento de trenes tipo Inneos proporcionados a la flota de transporte del Metro de Medellín, mostraremos además como es la estructura general de los mantenimientos por cada sistema y cada elemento, esto para entender como desde la diferencia de sistemas se logra una unificación y un criterio de delimitación de las tareas de mantenimiento y como estas se pueden incluir en cada intervalo de mantenimiento. En la Figura 6 observaremos el esquema de portada de un plan de mantenimiento.

### Figura 6

*Título Plan de Mantenimiento Trenes Metro de Medellín*




*Nota:* En esta imagen se observa cómo es la estructura de la documentación de un fabricante entrega a un cliente cuando se adquiere un vehículo tipo tren o cualquier vehículo fabricado por CAF. Tomado del sistema de base de datos internos de CAF, 2025.

Como podemos ver estos planes obtienen modificaciones en el tiempo basadas en la experiencia y basadas en las propias superestructuras ferroviarias indicando que los

mantenimientos de equipos como estos son dinámicos en el tiempo por tanto deben ser modificables y adaptables ante las circunstancias de cada una de las explotaciones. En este caso podemos observar que estamos en la edición 6 del plan de mantenimiento modificado en Julio de 2021. A continuación, en la Figura 7 podremos ver como el plan de mantenimiento define lo que se llaman intervalos de mantenimiento.

## Figura 7

*Intervalos de Mantenimiento Definidos por Kilometraje de las Unidades.*



Metro de Medellín Ltda.

Plan de Mantenimiento


INTERVALOS

### INTERVALOS DE MANTENIMIENTO

- Elemento y Partes a Visitar:** Define la organización de todos los componentes en los cuales es necesario realizar las operaciones de mantenimiento preventivo.
- Tareas a Efectuar:** En esta columna se listarán todas las operaciones de mantenimiento que se deben realizar en la parte a visitar correspondiente.
- Tiempo:** En estas columna se listarán los tiempos estimados (horas) para realizar la operación. Estos tiempos son una estimación y podrán ser ajustados por Metro en función de los resultados de sus equipos de mantenimiento.
- Especialidad:** Esta columna listará la especialidad del personal técnico necesario para realizar la operación de mantenimiento.
- Frecuencias:** En las columnas de frecuencias se señalan, para cada una de las operaciones a efectuar, las frecuencias en las cuales se deben realizar.
- Observaciones:** Esta columna está reservada para cualquier observación o información adicional que se desee incluir respecto a una operación de mantenimiento a realizar. Además se incluirán las referencias a los subapartados de la Norma Técnica de Mantenimiento, donde se explica en detalle como realizar la operación a efectuar.

Las frecuencias a utilizar en este manual son las siguientes:

	Frecuencias	Tolerancias
V	30 días (12.500 km)	3 días
M1	37.500 km	3.750 km
M2	75.000 km	7.500 km
M3	150.000 km	15.000 km
RI1	300.000 km	30.000 km
RI2	600.000 km	90.000 km
RG	1.200.000 km	180.000 km



El recorrido medio anual se estima en 150.000 km.

*Nota:* En esta imagen se define la estructura del plan de mantenimiento y lo que encontraremos en cada subsistema y define las rutinas con sus diferentes intervalos. Tomado del sistema de base de datos internos de CAF, 2025.

Como podemos observar se define la estructura de lo que encontraremos en la siguiente planificación de mantenimiento, esto definido en una cantidad de kilómetros que recorre la unidad y bajo un criterio técnico y especializado que da cada fabricante y la experiencia que caracteriza a un fabricante de trenes, cada cuanto tiempo se debe ejecutar una tarea, cada una de estas tareas se enmarcan en cada rutina y cada intervalo siendo claro cuando se debe ejecutar cada una de ellas. En la Figura 8 evidenciaremos con el sistema de freno como se definen sus tareas y en que intervalo se deben ejecutar.

### Figura 8

*Identificación del Elemento Sistema de Freno y sus Elementos que lo Componen.*

		<b>PLAN DE MANTENIMIENTO</b> Según componentes <b>METRO MEDELLÍN LTDA.</b>								
	Tiempo	Especialidad	V	M1	M2	M3	R1	R2	RG	Observaciones
<b>MM.06.01 - Disco de Freno</b>										
Bogie										
Mecánica										
Limpieza de las aletas refrigeradoras	0.25		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.5
Control para detectar fisuras	0.15		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.1
Control para detectar manchas de quemaduras, adherencias y desprendimientos de material	0.15		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.2
<b>MM.06.02 - Pinza de Freno con Acumulador</b>										
Bogie										
Mecánica										
Comprobar Engrase	0.15		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.2
Revisión General	2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.4
Engrase de los Elementos del Conjunto	0.30		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.3.
Comprobar Estado	0.25		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.1
<b>MM.06.03 - Pinza de Freno sin Acumulador</b>										
Bogie										
Mecánica										
Comprobar Estado	0.25		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.1
Comprobar Engrase	0.15		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.2
Engrase de los Elementos del Conjunto	0.30		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Apartado 4.3.

Julio 2021 / Julio 2021 / Julio 2021

Ed. 6 / Ed. Amp. 3 / Ed. Amp. II 2

Página 17/40

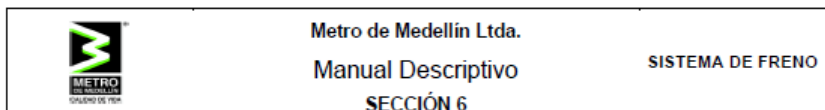
*Nota:* En esta imagen se identifica el sistema de freno como el sistema 6 del tren y en este se mencionan algunos elemento como disco de freno, pinza de freno con acumulador y pinza de freno sin acumulador. Tomado del sistema de base de datos internos de CAF, 2025.

Como vemos aquí en la imagen anterior logramos evidenciar como el sistema de freno 06 está compuesto por un grupo de elementos, la nomenclatura que se usa es la MM.06.XX, donde MM significa Manual de Mantenimiento y las XX representan cada uno de los elementos, también podemos ver en la columna que sigue la tarea a ejecutar en el caso del MM.06.02 Pinza de freno con acumulador podemos ver que se tienen las siguientes subtareas, comprobar engrase que es una actividad que por tiempo definidos por eficiencia operativa representan 15 minutos de duración para el técnico, se define como una tarea mecánica, y se indica que debe ejecutarse en la rutina V, M1, M2, M3 RI1, RI2 y RG y por último que esa tarea la podremos encontrar en el apartado 4.2 del manual, esta información se toma siempre de los manuales de mantenimiento del fabricante para esta pinza de freno que sería Knorr Bremse.

Para que un técnico comprenda como es un sistema de un tren, en este caso el de frenos, tiene algo que se llama un manual descriptivo el cual, le aporta el conocimiento necesario al técnico para entender la operación y el funcionamiento del elemento en condiciones normales de trabajo de la unidad de tren. En la Figura 9 evidenciaremos como es la estructura de un manual descriptivo.

## Figura 9

### Índice Manual Descriptivo del Sistema de Freno



### SECCIÓN 6 - SISTEMA DE FRENO

Edición: 1

Párrafo		Nº Página
6.1	INTRODUCCIÓN .....	6-2
6.2	DISCOS DE FRENO (C01).....	6-7
6.2.1	CONSTRUCCIÓN.....	6-7
6.2.2	FUNCIONAMIENTO .....	6-7
6.3	PINZAS DE FRENO .....	6-11
6.3.1	INTRODUCCIÓN .....	6-11
6.3.2	CONSTRUCCIÓN FUNCIONAL.....	6-11
6.3.2.1	Unidades de Pinza de Freno sin Acumulador por Muelle como Freno de Servicio (C05.01) .....	6-11
6.3.2.2	Unidades de Pinza de Freno con Acumulador por Muelle en calidad de Frenos de Servicio y de Estacionamiento (C02).....	6-16
6.3.3	FUNCIONAMIENTO .....	6-18
6.3.3.1	Aplicación del Freno de Servicio .....	6-18
6.3.3.2	Aplicación del Freno de Inmovilización.....	6-22
6.3.3.3	Afijamiento Auxiliar del Acumulador por Muelle Manual .....	6-22
6.4	CONJUNTO DESBLOQUEO (C02.01) .....	6-27
6.4.1	CONSTRUCCIÓN.....	6-27
6.4.2	FUNCIONAMIENTO .....	6-27
6.5	ZAPATAS DE FRENO (C06) .....	6-28
6.5.1	DESCRIPCIÓN .....	6-28
6.5.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	6-29

*Nota:* En esta imagen se identifica el manual descriptivo del sistema de freno como el sistema 6 del tren y su diferentes sistemas que lo componen. Tomado del sistema de base de datos internos de CAF, 2025.

Como vemos aquí tenemos un conjunto de directrices descriptivas de lo que compone el sistema de freno, su características técnicas, su funcionamiento, y el proceso de operación normal de los equipos.

A continuación, estudiaremos un poco la estructura del manual de mantenimiento MM.06.02 Pinza de Freno con acumulador, evidenciaremos la estructura, en la cual para todos los sistemas y todos los elementos siempre se conservará, y está conformado por lo siguiente:

- Registro de Ediciones: donde se establece las modificaciones que se hallan realizado a las actividades las cuales deben registrarse como ampliaciones o nuevas ediciones.
- Índice: representa lo que encontraremos en el manual definido por la figura 7, evidencia las páginas y cada uno de los ítems del manual.
- Condiciones previas: en este apartado encontramos las preparaciones previas al mantenimiento, el listado de consumibles, el listado de herramientas especiales y las disposiciones de seguridad y equipos de protección.
- Desmontaje y montaje: en este apartado se encuentra el paso a paso del desmontaje y luego del montaje y las pruebas que deban realizarse antes de la puesta en servicio.
- Mantenimiento correctivo: como su nombre lo indica son las actividades por realizar en la pinza de manera correctiva en el caso de daños o fallas definidas por tareas del fabricante para solucionar averías.
- Mantenimiento preventivo: en este apartado encontramos en lo que se basa el plan de mantenimiento y son el paso a paso de como ejecutar cada una de las tareas estipuladas en el plan, aquí encontramos nuestra tarea antes descrita comprobar engrase de la Figura 8 y observaremos el paso a paso de esta actividad.
- Anexos: son algunas recomendaciones del fabricante con respecto a ciertas actuaciones que no están descritas en el manual o la mejor forma de realizarlas.
- Ampliación a 3 unidades: en este apartado se define si la unidad de tren se pudiera acoplar con tres unidades como tendría que ser el sistema esto casi siempre se encuentra vacío porque este tipo de trenes Inneos del Metro de Medellín solo tiene compatibilidad para dos unidades de tren.


Figura 10

*Índice del Manual de Mantenimiento de la Pinza de Freno con Acumulador*

Metro de Medellín Ltda.		INDICE
MM.06.02		
PINZA DE FRENO CON ACUMULADOR (C02)		
ÍNDICE		
Nº Párrafo	Título	Nº Página
REGISTRO DE EDICIONES .....		A
INDICE .....		B
SECCIÓN 1 - CONDICIONES PREVIAS .....		1-1
1.1	PREPARACIÓN PREVIA AL MANTENIMIENTO .....	1-1
1.2	LISTADO DE CONSUMIBLES Y MATERIALES FUNGIBLES .....	1-1
1.3	LISTADO DE HERRAMIENTAS ESPECIALES .....	1-1
1.4	LISTADO DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN .....	1-2
SECCIÓN 2 - DESMONTAJE Y MONTAJE .....		2-1
2.1	DESMONTAJE .....	2-2
2.2	MONTAJE .....	2-4
2.2.1	Prueba de Hermeticidad .....	2-4
2.2.2	Prueba de Funcionamiento .....	2-4
SECCIÓN 3 - MANTENIMIENTO CORRECTIVO .....		3-1
SECCIÓN 4 - MANTENIMIENTO PREVENTIVO .....		4-1
4.1	COMPROBAR ESTADO .....	4-1
4.2	COMPROBAR ENGRASE .....	4-1
4.3	ENGRASAR LOS ELEMENTOS DEL CONJUNTO .....	4-1
4.4	REVISIÓN GENERAL .....	4-3
4.4.1	Despiece .....	4-3
4.4.1.1	Desmontaje de los Conjuntos .....	4-9
4.4.1.2	Despiece de los Conjuntos .....	4-9
4.4.2	Eliminación .....	4-18
4.4.3	Limpieza .....	4-19
4.4.4	Inspección .....	4-20
4.4.5	Ensamblaje .....	4-32
4.4.5.1	Pintura .....	4-33
4.4.5.2	Engrasado de las Piezas Individuales .....	4-33
4.4.5.3	Hermetizante y Pegamento .....	4-33
4.4.5.4	Fijación de Tornillos .....	4-34
4.4.5.5	Ensamblaje de los Conjuntos .....	4-35
4.4.5.6	Montaje de los Conjuntos .....	4-46
SECCIÓN 5 - ANEXOS .....		5-1
5.1	AVISOS PARA DESMONTAR LAS JUNTAS .....	5-1
5.2	AVISOS PARA MONTAR LAS JUNTAS .....	5-1
5.3	HERRAMIENTAS ESPECIALES .....	5-2
SECCIÓN 6 - AMPLIACIÓN TRES UNIDADES .....		6-1
MM.06.02 - Pinza de freno con acumulador (C02) Ed. 1 / Ed. Amp. 0		B

*Nota:* En esta imagen se identifica el índice de un manual de mantenimiento. Tomado del sistema de base de datos internos de CAF, 2025.

**Figura 11** *Actividades de Mantenimiento*



	<p>Metro de Medellín Ltda.</p> <p>MM.06.02</p> <p>PINZA DE FRENO CON ACUMULADOR (C02)</p>	<p>MANTENIMIENTO PREVENTIVO</p>
---	---	-------------------------------------

**SECCIÓN 4 - MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

Edición: 1

**4.1 COMPROBAR ESTADO**

	<p><b>SUPERFICIES MUY CALIENTES. QUEMADURAS ALREDEDOR DE DISCOS DE FRENO MUY CALIENTES. ESPERAR QUE LAS SUPERFICIES SE ENFRIEN. LLEVAR GANTES PROTECTORES.</b></p>
	<p><b>Peligro por guarniciones de freno inadmisiblemente gastadas. Deterioros de la unidad con perjuicios funcionales, por ejemplo, calentamiento excesivo del freno; reducción de la fuerza de frenado. El espesor de las guarniciones de freno no debe quedar por debajo del espesor mínimo admisible para los portaguarniciones según la documentación.</b></p>

Comprobar el correcto estado de las pinzas de freno:

- Controlar la no obstrucción del orificio de escape con una herramienta en forma de varilla.
- Controlar los daños en la unidad de pinza de freno y, en especial, en los fuelles.
- Controlar el espesor residual de las guarniciones de freno. Ver MM.08.05.

**4.2 COMPROBAR ENGRASE**

Comprobar el engrase de los elementos del conjunto de las pinzas de freno con grasa RENOLIT HLT2-KB.

**4.3 ENGRASAR LOS ELEMENTOS DEL CONJUNTO**

Engrasar periódicamente los elementos del conjunto con grasa RENOLIT HLT2-KB. Para ello:

1. Desmontar el bulón y aplicar grasa en las zonas indicadas en las siguientes figuras.
2. Volver a montar.

*Nota:* En esta imagen se identifica la actividad 4.2 Comprobar engrase, en la cual define que es una actividad visual de comprobar la cantidad o la ausencia de grasa en el conjunto y en el caso de novedad ajustar con un fungible o consumible llamado RENOLIT HLT2. Tomado del sistema de base de datos internos de CAF, 2025.

Así, cada uno de los sistemas y cada uno de los elementos tendrá su manual de mantenimiento con cada una de las actividades a ejecutar sirviendo de gran ayuda a los técnicos mantenedores de tren, a realizar de una manera organizada, sin duplicidad de actividades, y con trazabilidad de todas las actividades de mantenimiento, esto no solo se convierte en una base de

datos justificativa de la ejecución del mantenimiento también se convierte en una rutina basada en la confiabilidad y representa lo que es las buenas prácticas de mantenimiento.

### **Definición de Criterios Técnicos de Mantenimiento**

La definición de criterios técnicos de mantenimiento representa una base fundamental en la elaboración de planes de mantenimiento ferroviario, ya que permite organizar y clasificar las actividades de acuerdo con su propósito, alcance y nivel de intervención. Estos criterios proporcionan una guía estandarizada para la gestión de activos, asegurando que las labores de inspección, reparación y sustitución se ejecuten de manera eficiente, segura y alineada con la normativa internacional y las recomendaciones de los fabricantes. En este apartado se especificarán los diferentes parámetros que deben considerarse en la planificación, tales como el mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo y basado en confiabilidad (RCM), con el fin de estructurar planes integrales que garanticen la disponibilidad, confiabilidad y sostenibilidad de los sistemas ferroviarios.

En la gestión de mantenimiento se categorizan las actividades en función de su naturaleza y propósito, enfocadas en la necesidad particular del sistema, para esto definiremos algunos de los tipos de mantenimiento que se usan en los sistemas ferroviarios y que además ayudan a la buena implementación de los planes de mantenimiento:

#### ***Mantenimiento Preventivo (Basado en Tiempo y Condición)***

IBM (s. f.) define el mantenimiento preventivo como la realización de labores de mantenimiento programadas periódicamente con el fin de evitar futuras anomalías e imprevistos. En si es mantener los equipos antes de que entren en una avería.

A través del machine learning, el análisis de datos operativos y la monitorización predictiva del estado de los activos, los ingenieros pueden optimizar el mantenimiento y reducir

los riesgos de fiabilidad para las operaciones de la planta o la empresa. El software diseñado para respaldar el mantenimiento preventivo ayuda a producir operaciones estables, garantizar el cumplimiento de las garantías y resolver problemas que afectan a la producción, antes de que ocurran.

Las situaciones industriales dependen en gran medida del mantenimiento programado con regularidad para mantener la plena productividad y no sufrir costosas averías mecánicas que hacen perder tiempo.

El término «mantenimiento preventivo» abarca una amplia gama de actividades y tareas generales prohibidas. Cada componente de producción dentro de un sistema requerirá cierto nivel de servicio periódico, y normalmente ese equipo necesitará al menos ser limpiado y lubricado. En otras situaciones, es posible que se necesite un servicio más amplio, que implica el reacondicionamiento, la reparación o incluso la sustitución en gran medida de ciertas piezas. En un nivel superior, el mantenimiento preventivo también implica el mantenimiento de la planta física que alberga los distintos sistemas de producción. Las tareas generales asociadas con este tipo de mantenimiento preventivo incluyen garantizar que el sistema HVAC esté en buenas condiciones de funcionamiento, que todos los sistemas eléctricos estén funcionando y cumplan con los estándares del código, y que toda la iluminación necesaria esté funcionando correctamente. (IBM, s. f.).

### ***Mantenimiento Correctivo (Ante Fallas)***

Según Stelorder (s. f.) el mantenimiento correctivo consiste en las actuaciones del servicio técnico en respuesta a avisos sobre el mal funcionamiento de algún equipo, activo o proceso. Comprende un grupo de tareas de índole técnica cuyo propósito es corregir los fallos que sobrevienen en el funcionamiento de los equipos ferroviarios.

Estas actuaciones pueden llegar a ser solicitadas de forma inesperada. No forman parte de un plan de mantenimiento programado, y podría incluso pasar mucho tiempo sin que nadie tuviera que abrir un ticket solicitando soporte.

De hecho, cuando ocurren estas incidencias, suele darse una situación crítica en los sistemas ferroviarios ya que el SAT no siempre cuenta con los suministros y los recursos adecuados para hacer frente a la incidencia. Es fácil presuponer que, cuando hay un sistema ferroviario que no está funcionando como debiera, la situación adquiere tintes de urgencia con facilidad.

El funcionamiento del mantenimiento correctivo consiste, por consiguiente, en que el operador del sistema solicite la asistencia técnica a un SAT cuando un equipo presente anomalías en su funcionamiento, o simplemente se haya hecho efectivo un fallo.

Esta definición basada en la normatividad es lo que más se utiliza en el ámbito ferroviario de mantenimiento ya que luego de una intervención de mantenimiento preventivo contratada se genera dentro de la contratación la disponibilidad de un SAT de atención de fallas y como llamamos nosotros en el ámbito del mantenimiento de material rodante un SAT de garantías del mantenimiento ejecutado, el cual solo se encargara de atender la novedades generadas a raíz del mantenimiento realizado previamente.

### ***Mantenimiento Predictivo (Diagnóstico Anticipado Mediante Sensores y Análisis de Datos)***

Basado en Logicbus (s. f.) el mantenimiento predictivo es una estrategia que emplea datos en tiempo real y modelos predictivos para identificar problemas antes de que ocurran. A diferencia del mantenimiento reactivo, que responde solo después de un fallo, y del mantenimiento preventivo, que sigue una programación fija, el mantenimiento predictivo se basa

en datos continuamente recopilados de los equipos. De este modo, se detectan patrones de desgaste o anomalías, permitiendo tomar acciones correctivas con precisión y eficiencia.

En el ámbito ferroviario, la gestión del mantenimiento del material rodante, ya sean trenes o vehículos auxiliares, incorpora técnicas modernas de mantenimiento predictivo basadas en el uso de sensores instalados en elementos críticos, como medidores de vibraciones, sensores de temperatura e interfaces hombre-máquina (IHM). Estos dispositivos registran información en tiempo real y gestionan alarmas operativas, permitiendo un monitoreo continuo de los sistemas a través de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). Mediante módems, gateways y equipos de transmisión de datos, la información llega a los puestos de control central (PCC) de las líneas ferroviarias, lo que facilita una supervisión integral. De esta manera, la industria ferroviaria avanza hacia la adopción de la Industria 4.0, integrando nuevos sistemas de gestión de mantenimiento y aprovechando el análisis de grandes volúmenes de datos (Big Data) para optimizar la confiabilidad y seguridad de sus operaciones.

### ***Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM)***

Considerando indicadores de criticidad, disponibilidad (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR), disponibilidad del sistema (A), tiempos de respuesta (MTTA), cumplimiento del mantenimiento preventivo (CMP).

Basado en lo que indica IBM. (s. f.) El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es un proceso en el que las empresas operadoras y fabricantes ferroviarios identifican los activos físicos (por ejemplo, vehículos, trenes, datacenter, sistemas PCI, sistemas de señalización ferroviaria, etc.) necesarios para prestar un servicio confiable de transporte a nivel ferroviario y crear una estrategia integral para mantener todos los sistemas en línea y operando a un nivel óptimo.

El RCM es un proceso altamente personalizado con un enfoque único para cada activo adaptado a su uso, componentes clave y amenazas únicas a su usabilidad. El objetivo final es maximizar la disponibilidad del equipo y al mismo tiempo reducir la necesidad de reemplazar activos, reduciendo así los costos. Se diferencia de otros procedimientos de mantenimiento por el hecho de que trata cada activo de manera diferente, según sus necesidades específicas, su importancia para el proceso general y cómo debe monitorearse y mantenerse.

El análisis de mantenimiento centrado en la confiabilidad requiere que varios componentes trabajen en coordinación. Sobre todo, una empresa ferroviaria o prestadora de servicios de transporte masivo que funcione bien requiere un sistema en el que todos los trabajadores inicien sesión e identifiquen qué herramientas y equipos utilizan para que la organización comprenda la cantidad de uso y desgaste de sus trenes como puntos de datos importantes para incorporar su programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad.

- Descubrimiento de activos: En esta fase, las empresas mantenedoras ferroviarias definen e identifican todo el espectro de activos disponibles, que puede ser todo en el sitio o solo las herramientas que contribuyen a los productos reales.
- Criterios de evaluación: Una vez identificados todos los activos, se debe crear una lista de criterios para evaluar el estado de cada uno de ellos. Algunas empresas mantenedoras seguirán las pautas de la industria, crearán las suyas propias o utilizarán una combinación de ambas.
- Documentación sobre el uso: ¿El activo está diseñado y se usa según lo previsto, o se ha personalizado o alterado para adaptarse a las especificaciones únicas del sistema? Si es así, ¿cómo afecta eso a su confiabilidad y qué pasaría si falla?

- **Monitoreo del estado de los activos:** Incluye el monitoreo habitual de activos individuales o partes del equipo para identificar si se requiere mantenimiento o reemplazo. El uso de monitoreo en tiempo real significa que, en cualquier momento, alguien puede consultar el estado de un sistema, herramienta o proceso. El resultado es un flujo continuo de información de baja latencia a la que las partes autorizadas pueden acceder en cualquier momento.
- **Análisis de criticidad:** Determina qué tan importante es cada activo y qué pasaría con el proceso general si fallara.
- **Seguimiento:** A continuación, los activos se ingresan y rastrean en un sistema de gestión, que incluye cada activo, codifica el proceso de mantenimiento y asigna la criticidad inherente del activo al proceso general. Normalmente esto se logra usando una GMAO, que rastrea las órdenes de trabajo, los historiales de mantenimiento y el inventario de piezas de repuesto.
- **Detección:** ¿El activo tiene sensores automáticos para determinar el estado de las funciones de su sistema? ¿O requiere un proceso manual de evaluación de calidad que identifique la situación actual? La empresa mantenedora debe analizar las posibilidades de detección manual y automática de cada activo, lo que le permite optimizar la forma en que aborda el mantenimiento.
- **Probabilidad de fallo:** A cada activo se le debe asignar un riesgo de fallo rodante, que depende de su riesgo global, de las causas probables de fallo y de cualquier nueva información pertinente sobre su situación actual. Muchos procesos RCM utilizan el FMEA (Análisis del modo y los efectos de fallos) para determinar la probabilidad de fallo de cualquier activo físico concreto.

- Consecuencias del fallo: es importante saber qué sucederá si un activo falla o por qué lo hace (es decir, modo de fallo), ya que esto tiene implicaciones en la seguridad en el lugar de trabajo, los retrasos en la producción y otros impactos comerciales. Conocer la diferencia entre los activos críticos y los menos integrales para el proceso general ayudará a las empresas mantenedoras a crear una estrategia de mantenimiento efectiva para mantener todos sus activos en funcionamiento.

- Análisis de causa raíz: Si un activo falló, los especialistas de mantenimiento ferroviario deben identificar por qué lo hizo e implementar cualquier tarea nueva y proactiva que elimine la probabilidad de que se produzca un fallo futuro. Esto incluye determinar si el activo específico contaba con estándares de alto rendimiento o estaba defectuoso.

También es necesario definir algunos parámetros que se le imponen a todos los mantenedores que son estos criterios para tener en cuenta una criticidad, los cuales son usados a la hora de crear un contrato de mantenimiento con una empresa, en el caso del Metro de Quito la empresa definía unos indicadores clave de desempeño (KPI). (eMaint. (s. f.))

Los indicadores se dividen en dos categorías: Informativos y de Evaluación.

**Indicadores Informativos:** Permiten a la empresa mantenedora y a la empresa dueña del sistema comprobar el funcionamiento óptimo de los sistemas y subsistemas, controlando su calidad, tanto fáctica como percibida. Se usarán para mejorar el servicio, conocer los puntos débiles y los puntos fuertes, y gestionar el proceso de mejora.

**Indicadores de Evaluación:** Estos indicadores, además de informativos, son los que afectan al cálculo del pago al finalizar el ejercicio mensual. Para ello, se debe contabilizar la importancia de cada uno de los indicadores, y obtener un valor final. (tomado de los TDR (términos de referencia) para el contrato de mantenimiento del Metro de Quito, 2024).

Algunos de los indicadores informativos que se aplicaban al mantenedor y que lo obligaban a llevar el sistema basado en la confiabilidad eran:

**MTTR (Mean Time To Repair / Mean Time To Resolution).** Definido como el tiempo medio de resolución de una falla, este indicador es el cociente de dividir el número (N°) de horas que se han dedicado a mantenimiento entre el número (N°) de órdenes de trabajo resueltas:

Ecuación MTTR

$$\text{T tiempo medio} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de horas dedicadas al mantenimiento}}{\text{N}^\circ \text{ de O.T. resueltas}}$$

**MTBF (Mean Time Between Failures).** Definido como el tiempo medio entre fallas, El Mantenedor siempre de asegurar cumplir con ciertos niveles de MTBF de los equipos en función de las características del sistema.

El mantenedor deberá monitorizar mediante los registros respectivos, el MTBF (tiempo medio entre fallos) de los equipos de los sistemas a fin de facilitar este valor a la empresa operadora ferroviaria o el cliente de forma mensual.

Su cálculo se lo realizará de la siguiente manera:

Ecuación MTBF

$$\text{MTBF} = \frac{\text{T tiempo total disponible} - \text{tiempo de inactividad}}{\text{N}^\circ \text{ total de fallos acumulados}}$$

Otro parámetro asociado al MTBF es la mantenibilidad en el tiempo, Se consideran 24 horas de reparación durante los 365 días del año. El indicador de mantenibilidad por cada sistema será calculado de la siguiente forma:

## Ecuación Mantenibilidad

$$\text{Mantenibilidad} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Tiempo de reparación}}{\text{N}^\circ \text{ total de de reparaciones}}$$

Los indicadores de evaluación más usados y con los que se daban limitantes de pago en los contratos eran los siguientes:

**Disponibilidad (A).** Este indicador se basaba en a la relación existente entre el tiempo real de funcionamiento y el tiempo teórico de funcionamiento, expresado en tanto por ciento.

La disponibilidad se calcula de la siguiente forma:

## Ecuación Disponibilidad (A)

$$\text{Disponibilidad sistema (A)} = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{interrupciones}_i \times \text{Duración}_i)}{\text{N}^\circ \text{ total equipos por sistema} \times \text{TPS}} \right) \times 100$$

Donde:

Duración: horas/mes

TPS: Tiempo Programado de Servicio - horas/mes

**Tiempo de Respuesta (MTTA).** Se entiende como el tiempo máximo que transcurre desde que, el Operador del sistema comunica una anomalía y el momento que el personal de mantenimiento que va a realizar la actuación “in situ” se encuentra físicamente en el lugar donde se ha producido el fallo. El tiempo de respuesta para cada subsistema se determinará de la siguiente forma:

## Ecuación MTTA

$$\text{MTTA} = \frac{\sum(TS - TN)}{\text{N}^\circ \text{ intervenciones en el periodo}}$$

Donde:

TR = Tiempo de respuesta (hora)

TS = Tiempo de llegada a sitio (hora)

TN = Tiempo de notificación por parte del Operador (hora)

**Cumplimiento del Mantenimiento Preventivo (CMP).** Este indicador evalúa el porcentaje de actividades de mantenimiento preventivo programadas para un mes dado que han sido ejecutadas dentro de los límites fijados.

No se tendrán en cuenta en el cálculo aquellas intervenciones que hayan sido canceladas de forma justificada por motivos no imputables al mantenedor del sistema, como: fuerza mayor, soporte a peticiones por una mayor prioridad y demás que dispongan de su justificación técnica.

Este indicador deberá cumplirse al 100%, por lo que la no ejecución en su totalidad será considerada como un incumplimiento.

Ecuación CMP

$$CMP = \frac{\text{N}^\circ \text{ órdenes mantenimiento preventivo ejecutadas en el periodo}}{\text{N}^\circ \text{ órdenes mantenimiento preventivo totales planificadas en el periodo}} \times 100\%$$

En síntesis, con este apartado, todos estos criterios se alinearán con la normativa internacional y las recomendaciones de fabricantes para asegurar la estandarización de los procesos. En conclusión, la definición y aplicación de estos criterios técnicos permiten que los planes de mantenimiento ferroviario no se limiten a un listado de actividades aisladas, sino que se consoliden como documentos metodológicamente estructurados y orientados a la gestión integral de los activos. La integración del mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo y basado en confiabilidad, junto con los parámetros de criticidad, disponibilidad, tiempo medio de reparación y costos del ciclo de vida, constituye la base para diseñar planes unificados, estandarizados y adaptados a la realidad operativa de cada sistema ferroviario. De este modo, se asegura que la planificación de las intervenciones responda tanto a las exigencias normativas internacionales como a las recomendaciones de los fabricantes, garantizando altos niveles de

seguridad, confiabilidad y eficiencia en la operación ferroviaria. (tomado de los TDR (términos de referencia) para el contrato de mantenimiento del Metro de Quito, 2024).

### **Selección de Herramientas de Gestión en la Propuesta Metodológica**

Un plan de mantenimiento ferroviario unificado requiere no solo la definición de actividades técnicas, sino también la incorporación de **herramientas de gestión de activos** que garanticen confiabilidad, disponibilidad, trazabilidad y sostenibilidad de la infraestructura. En este sentido, la propuesta metodológica integra diversos enfoques reconocidos a nivel internacional, así como tendencias innovadoras propias de la **Industria 4.0**.

#### ***Enfoques de Gestión de Activos***

- RCM (Reliability-Centered Maintenance): permite identificar las funciones críticas de cada sistema ferroviario y definir estrategias de mantenimiento basadas en confiabilidad y consecuencias de fallos, priorizando la seguridad operacional (Moubray, 1997).
- TPM (Total Productive Maintenance): involucra activamente a operadores y técnicos en las actividades de mantenimiento preventivo, lo que incrementa la disponibilidad y reduce tiempos muertos (Nakajima, 1988).
- ISO 55000: establece un marco internacional de gestión de activos bajo principios de ciclo de vida, riesgos y mejora continua, garantizando la alineación con objetivos estratégicos (ISO, 2014).
- RBM (Risk-Based Maintenance): selecciona intervenciones en función de la criticidad de los activos y el riesgo asociado a fallas, especialmente útil en sistemas de señalización y PCI.
- PdM (Predictive Maintenance): basado en monitoreo de condición (vibraciones, temperatura, sensores IoT), permite anticipar fallas y reducir mantenimientos innecesarios.

- Lean Maintenance: orientado a la eliminación de desperdicios en tiempo, repuestos y recursos, optimizando la productividad del mantenimiento ferroviario.

### ***Indicadores de Desempeño (KPI)***

La metodología propone indicadores alineados con los objetivos de confiabilidad, seguridad, costos y sostenibilidad. Entre los principales se incluyen:

- Confiabilidad (MTBF): tiempo promedio entre fallos.
- Disponibilidad (A): porcentaje de tiempo operativo de los sistemas.
- Mantenibilidad (MTTR): tiempo promedio de reparación.
- Backlog de mantenimiento: número de órdenes de trabajo pendientes.
- Cumplimiento de mantenimiento preventivo: % de actividades ejecutadas vs. planificadas.
- OEE (Overall Equipment Effectiveness): mide efectividad global de equipos clave.
- Índice de sostenibilidad: reducción de consumo energético y huella de carbono en operaciones ferroviarias.

### ***Sistemas de Gestión Asistidos por Computador (CMMS/GMAO)***

El uso de CMMS (Computerized Maintenance Management System) o GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador) es un pilar en la digitalización de planes de mantenimiento. Estos sistemas facilitan la planificación, ejecución y trazabilidad de todas las actividades.

Ejemplos aplicables al sector ferroviario:

- SAP PM: integra procesos de mantenimiento con logística y finanzas.

- IBM Máximo: especializado en activos complejos, con análisis de fallos e inventarios.

- Infor EAM: flexible para gestionar activos distribuidos en redes ferroviarias.

Además, la transición hacia la Industria 4.0 potencia estas herramientas con:

- Integración IoT en tiempo real.
- IA y machine learning para mantenimiento predictivo.
- Gemelos digitales para simular escenarios de operación y fallos.
- Blockchain para trazabilidad de repuestos y auditorías.

### ***Propuesta de Valor***

La integración de estas herramientas y enfoques genera beneficios tangibles:

- Mejora la seguridad operacional y reduce fallas críticas.
- Disminuye costos y optimiza la vida útil de los activos.
- Asegura cumplimiento de normativas internacionales (UIC, EN, NFPA, ISO).
- Promueve la sostenibilidad, alineándose con los Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS).

### **Tabla 6**

#### *Comparativa de Herramientas de Gestión en Mantenimiento Ferroviario*

Herramienta/Enfoque	Objetivo Principal	Aportes al Sector Ferroviario	Limitaciones
RCM	Estrategias basadas en confiabilidad y fallos	Priorización de sistemas críticos (señalización, freno)	Requiere análisis detallado y alto conocimiento técnico
TPM	Involucrar a todo el personal	Aumenta disponibilidad y	Puede ser difícil de implementar en grandes equipos

Herramienta/Enfoque	Objetivo Principal	Aportes al Sector Ferroviario	Limitaciones
		reduce tiempos muertos	
ISO 55000	Gestión integral de activos	Marco normativo y estratégico para todo el ciclo de vida	Exige madurez organizacional
RBM	Mantenimiento según criticidad y riesgo	Reducción de fallos en activos de alto impacto	Requiere evaluación de riesgos precisa
PdM	Predicción de fallas mediante datos	Anticipa averías y optimiza recursos	Alta inversión en sensores y análisis de datos
Lean Maintenance	Reducir desperdicios en mantenimiento	Optimización de recursos y tiempos	Puede ser limitado en sistemas críticos de seguridad
CMMS/GMAO	Digitalizar gestión de mantenimiento	Trazabilidad, programación, control de repuestos	Requiere inversión tecnológica y capacitación

*Nota.* Esta tabla sintetiza la información sobre las herramientas usadas en la gestión de mantenimiento ferroviario y algunas son usadas en general en otros sistemas.

### **Diseño del procedimiento metodológico**

La propuesta metodológica para la estructuración de un plan de mantenimiento unificado en la infraestructura ferroviaria se organiza en una secuencia de pasos que permiten garantizar la trazabilidad, la eficiencia y la alineación con normativas internacionales. Este procedimiento busca integrar criterios técnicos, regulatorios y de gestión de activos, con el fin de consolidar un esquema que responda a las necesidades operativas y de sostenibilidad del sistema ferroviario.

### ***Levantamiento de Información Técnica de Cada Sistema***

En esta primera etapa se recopila la información existente sobre los sistemas ferroviarios, incluyendo manuales de fabricante, normativas aplicables (NFPA, IEC, UIC, EN, ISO), planos, históricos de fallas y órdenes de trabajo. Este levantamiento constituye la línea base para el diagnóstico inicial de los activos y sus requerimientos de mantenimiento (Kelly, 2006).

### ***Clasificación de Activos y Jerarquización de Criticidad***

Posteriormente, se identifican y clasifican los activos, estableciendo su jerarquía en función de criterios de seguridad, impacto en la operación, disponibilidad y costos asociados. Para ello se aplican metodologías de análisis de criticidad, que permiten priorizar aquellos equipos o sistemas cuya falla representa mayores riesgos o pérdidas (Moubay, 1997).

### ***Definición de Actividades de Mantenimiento con Base en Normativas y Manuales***

Con la información recolectada, se definen las actividades de mantenimiento preventivo, predictivo o correctivo, sustentadas en normativas internacionales y recomendaciones de fabricantes. Este enfoque asegura que los planes estén alineados con estándares de seguridad y confiabilidad reconocidos a nivel global (ISO, 2014; UIC, 2018).

### ***Establecimiento de Frecuencias y Recursos Necesarios***

En esta etapa se determinan las frecuencias de las intervenciones (diarias, semanales, mensuales, anuales) y se asignan los recursos técnicos y humanos requeridos, incluyendo repuestos, herramientas y sistemas de gestión. De esta manera se facilita la planificación de la carga de trabajo y la optimización de recursos disponibles (Pintelon & Parodi-Herz, 2008).

### ***Integración de los Planes por Sistema en un Esquema Unificado***

A partir de los planes específicos de cada subsistema (energía, señalización, climatización, ventilación, PCI, telecomunicaciones), se desarrolla un plan maestro unificado de

mantenimiento. Este esquema evita duplicidades, promueve la coordinación de actividades y mejora la eficiencia en la asignación de recursos, asegurando una gestión integral de la infraestructura ferroviaria (Nakajima, 1988).

### ***Validación Mediante Matrices de Criticidad y Análisis Costo-Beneficio***

Finalmente, se validan los planes a través de matrices de criticidad y análisis costo-beneficio, con el propósito de verificar que la propuesta metodológica optimiza la seguridad, la disponibilidad y la sostenibilidad económica. Esta etapa permite demostrar la viabilidad técnica y financiera de la metodología planteada, reforzando su aplicabilidad en entornos ferroviarios modernos (Moubray, 1997; Kelly, 2006).

### **Digitalización y Trazabilidad del Mantenimiento**

La digitalización y trazabilidad del mantenimiento se refiere a la incorporación de herramientas tecnológicas para registrar, almacenar, gestionar y analizar de forma centralizada toda la información asociada a las actividades de mantenimiento, garantizando que estas puedan ser consultadas, verificadas y auditadas en cualquier momento. La digitalización permite sustituir registros manuales o aislados por sistemas integrados que unifican la planificación, ejecución y control de las tareas, mientras que la trazabilidad asegura que cada intervención realizada quede documentada con su fecha, responsable, procedimiento y estado del activo. Este enfoque responde a los lineamientos de gestión de activos establecidos en normas como la ISO 55000 y la EN 50126, que destacan la importancia de la integridad y continuidad de la información para la toma de decisiones, la mejora de la confiabilidad y la sostenibilidad operativa de las infraestructuras ferroviarias. En conjunto, la digitalización y la trazabilidad permiten disponer de una visión completa del ciclo de mantenimiento, reducir errores, evitar traslapes de actividades y fortalecer la transparencia y coordinación entre los equipos involucrados.

### ***Importancia de la Digitalización en la Gestión Ferroviaria***

La infraestructura ferroviaria moderna se compone de múltiples sistemas interdependientes cuya operación segura depende de la ejecución coordinada del mantenimiento. En este contexto, la digitalización permite asegurar la continuidad documental, la trazabilidad de actividades y la disponibilidad de la información para la toma de decisiones. Según la ISO 55000, la gestión de activos requiere que la información sea confiable, verificable y mantenida durante todo el ciclo de vida de los sistemas (ISO, 2014).

Asimismo, la norma EN 50126 establece que las organizaciones ferroviarias deben documentar las actividades que afectan la confiabilidad, disponibilidad y seguridad del sistema (CENELEC, 2017). La digitalización contribuye directamente a estos requisitos al centralizar y estandarizar los registros de mantenimiento.

### ***Fichas de Mantenimiento como Base de la Estandarización***

Las fichas de mantenimiento constituyen una herramienta fundamental para la estandarización operativa. Estas definen claramente los procedimientos, parámetros de control, herramientas, materiales y criterios de aceptación asociados a una tarea de mantenimiento. De acuerdo con Moubray (1997), la estandarización de las tareas reduce la variabilidad y mejora la calidad de la ejecución al incorporar el conocimiento técnico en procedimientos repetibles.

Además, la transición desde fichas en papel hacia fichas digitales permite mantener la estructura operativa, pero con mayor facilidad de almacenamiento, búsqueda y actualización (Wireman, 2010).

Por lo tanto, las fichas de mantenimiento constituyen no solo un instrumento para la ejecución estandarizada, sino también una estructura formal para el registro y archivo de la información derivada de cada intervención. Estas pueden complementarse con protocolos de

mantenimiento, entendidos como documentos de verificación posterior a la ejecución, en los cuales se registran mediciones, condiciones de operación, evidencias fotográficas y la validación final del técnico responsable. Dichos protocolos permiten confirmar que la actividad se realizó conforme a los parámetros establecidos y que el sistema se encuentra en condiciones adecuadas para volver a operación.

En el caso del sistema ferroviario del Metro de Quito, por ejemplo, este enfoque se refleja en la estructura de las fichas de mantenimiento para los subsistemas de distribución de energía empleadas por la empresa SIEMENS, donde se detalla el procedimiento, los parámetros de control y los registros de verificación de manera clara y trazable en la Figura 12.

Este tipo de formato facilita la estandarización, la auditoría y la integración posterior a plataformas digitales para la gestión centralizada del mantenimiento.



### ***Registro Centralizado y Almacenamiento de la Información***

Para garantizar la continuidad documental, la información de las ejecuciones de mantenimiento debe almacenarse en una base de datos centralizada y accesible para todos los actores involucrados. Los sistemas GMAO/CMMS (Computerized Maintenance Management Systems) permiten registrar la ejecución de tareas, gestionar inventarios, programar actividades preventivas y generar reportes históricos. Según la Society for Maintenance and Reliability Professionals (SMRP, 2019), los registros digitalizados mejoran la trazabilidad y la toma de decisiones basada en datos.

### ***Plataforma Digital para la Gestión del Mantenimiento***

La adopción de plataformas digitales como Cocochi, Planner, SAP PM, MP9 o Infraspak, permite coordinar las actividades en tiempo real, evitando traslapes y asegurando la correcta asignación de recursos humanos y operativos. Los sistemas de gestión digital permiten:

**Tabla 7**

#### *Plataformas Digitales para la Gestión de Mantenimiento*

Función	Beneficio
Programación y calendarización	Evita omisiones y retrasos
Asignación de recursos	Reduce duplicidades y conflictos en vía
Registro digital con evidencia	Aumenta la trazabilidad operativa
Reportes automáticos	Facilita auditorías y toma de decisiones
Visualización de carga de trabajo	Optimiza el uso de recursos

*Nota.* Esta tabla representa las funciones y beneficios de un sistema digital de gestión de mantenimiento.

La transparencia en la planificación evita conflictos operativos entre equipos y mejora la disponibilidad de la infraestructura (Kelly & Harris, 2011).

### ***Trazabilidad y Planificación Colaborativa***

La trazabilidad implica que cada actividad queda documentada, fechada, asociada a un activo y responsable, garantizando responsabilidad técnica y verificación posterior. Los Dashboard operativos construidos sobre plataformas como Power BI o Grafana permiten visualizar el estado global del mantenimiento, facilitando la gestión colaborativa y la coordinación interdepartamental.

Esto responde a los principios de gestión integrada del ciclo de vida establecidos por la ISO 55010 (ISO, 2019).

### **Lineamientos Finales**

La propuesta metodológica desarrollada en esta monografía buscó establecer una ruta clara para la estructuración de planes de mantenimiento ferroviario organizados por sistemas funcionales, fundamentados en normativas internacionales, manuales de fabricantes, experiencias operativas y herramientas de digitalización que permitan garantizar la trazabilidad documental en el tiempo. En este sentido, a partir del análisis realizado y de las prácticas revisadas en el Metro de Quito, Metro de Medellín y CAF Colombia, se consolidan los siguientes lineamientos orientadores para la implementación progresiva de un modelo unificado de mantenimiento. Podemos destacar los siguientes puntos:

#### ***Unificación de los Planes de Mantenimiento por Sistemas Funcionales***

Se recomienda organizar los planes de mantenimiento en torno a sistemas funcionales (telecomunicaciones, climatización, ventilación, energía, PCI, señalización, superestructura, etc.), en lugar de estructurarlos únicamente por fabricante o equipo aislado.

Este enfoque, alineado con los principios establecidos por EN 50126 (RAMS), favorece una visión integral de la infraestructura y permite identificar interdependencias técnicas,

facilitando la planificación segura de las actividades (CENELEC, 2017). Asimismo, se promueve la coherencia documental y se disminuyen las duplicidades operativas señaladas por Smith & Hawkins (2004), mejorando la eficiencia de los recursos disponibles.

### ***Estandarización de Formatos y Procedimientos***

La implementación de fichas de mantenimiento y protocolos de verificación estandarizados es esencial para asegurar la repetibilidad y calidad de las intervenciones.

Como plantean Moubray (1997) y Wireman (2010), la estandarización reduce la variabilidad en la ejecución, protege el conocimiento técnico y aporta claridad operativa para los técnicos en campo. Además, la estandarización documental facilita auditorías, entrenamientos y la integración progresiva de herramientas digitales.

Se recomienda que todas las fichas incluyan:

- Objetivo de la tarea
- Paso a paso técnico
- Parámetros de control y criterios de aceptación
- Herramientas, repuestos y consumibles requeridos
- Evidencias de ejecución y firma o registro digital

### ***Mejora Continua Basada en Indicadores de Desempeño (KPI)***

La metodología debe incorporar mecanismos de evaluación constante.

Indicadores como MTBF, MTTR, Disponibilidad (A) y Cumplimiento del mantenimiento preventivo (CMP) permiten diagnosticar el estado real de los sistemas y orientar decisiones técnicas y presupuestales (ISO, 2014).

Asimismo, el análisis histórico de fallas recurrentes posibilita la migración gradual desde esquemas correctivos hacia prácticas de mantenimiento basadas en confiabilidad (RCM), aumentando la vida útil de los activos y reduciendo riesgos operativos.

### ***Aseguramiento de la Sostenibilidad Técnica y Operativa***

La sostenibilidad no solo se expresa en términos ambientales, sino también en la capacidad de mantener la infraestructura con continuidad, seguridad y eficiencia en el tiempo.

Conforme al marco de gestión de activos ISO 55000, la sostenibilidad del mantenimiento se logra cuando existen:

- Procesos documentados y estandarizados
- Capacidades técnicas instaladas en los equipos humanos
- Sistemas de información que garantizan trazabilidad
- Ciclos de revisión y mejora continua

Esto permite que el conocimiento no dependa únicamente de la experiencia individual del personal, sino que quede institucionalizado, asegurando la continuidad del servicio ferroviario incluso frente a rotación de personal o cambios operativos.

### **Digitalización y Trazabilidad como Soporte Transversal**

Finalmente, la digitalización constituye el soporte operativo que garantiza que la metodología pueda sostenerse y evolucionar en el tiempo. El uso de plataformas GMAO/CMMS, servidores documentales y tableros de control permite:

- Registrar cada actividad de mantenimiento en tiempo real
- Evitar traslapes y conflictos de programación
- Facilitar la toma de decisiones basada en datos
- Dar transparencia a las responsabilidades y ejecuciones

Como se evidenció en experiencias prácticas en GMQ y CAF, la digitalización no reemplaza la ficha ni el procedimiento, sino que los amplifica, asegurando continuidad documental y trazabilidad histórica.

### Síntesis

Los lineamientos expuestos consolidan una metodología progresiva y adaptable para la gestión del mantenimiento ferroviario, fundamentada en:

### Tabla 8

#### *Lineamientos Metodológicos*

Pilar	Enfoque	Resultado Esperado
Unificación	Organización por sistemas	Claridad y coherencia operativa
Estandarización	Fichas y protocolos	Ejecuciones homogéneas y trazables
Mejora continua	KPI + análisis de fallas	Decisiones basadas en datos
Sostenibilidad	Gestión de activos	Continuidad segura en el tiempo
Digitalización	CMMS + Dashboard	Transparencia y eficiencia colaborativa

*Nota:* Esta tabla representa los pilares y el enfoque de la metodología expuesta en la monografía.

Estos elementos permiten avanzar hacia un modelo ferroviario moderno, alineado con los principios técnicos internacionales y con la experiencia operativa real consolidada durante el desarrollo de este trabajo.

## Conclusiones

La Ingeniería Electrónica se consolida como un eje habilitador del mantenimiento ferroviario moderno, al proporcionar las bases tecnológicas necesarias para la transición desde esquemas correctivos y preventivos tradicionales hacia enfoques preventivos avanzados y orientados a la condición. A través de sistemas electrónicos de adquisición de datos, automatización y supervisión, es posible fortalecer la toma de decisiones técnicas y mejorar la confiabilidad de los activos ferroviarios.

El análisis desarrollado en la monografía evidencia que la integración de sensores electrónicos, sistemas telemétricos y plataformas de monitoreo continuo constituye un elemento clave para la estructuración de planes de mantenimiento unificados. Estas tecnologías permiten capturar información relevante del estado operativo de los sistemas ferroviarios, facilitando la trazabilidad, el análisis histórico y la detección temprana de comportamientos anómalos, aspectos fundamentales para una gestión de mantenimiento basada en datos.

A partir de la revisión del estado del arte, se identifica que la Inteligencia Artificial (IA) y el análisis avanzado de datos emergen como componentes estratégicos en el mantenimiento ferroviario contemporáneo. Técnicas como el machine learning y el deep learning muestran un alto potencial para la detección temprana de fallas incipientes, la clasificación automática de defectos, la predicción de la degradación y de la vida útil de los activos, así como para la priorización dinámica de las intervenciones de mantenimiento, alineándose con los principios de la gestión de activos moderna.

La articulación interdisciplinaria entre la ingeniería electrónica, la ingeniería de mantenimiento, la ingeniería mecánica y la ingeniería eléctrica permite consolidar una metodología de mantenimiento más robusta y escalable. En este contexto, la ingeniería

electrónica actúa como elemento integrador, al habilitar la instrumentación, el procesamiento de señales y la digitalización de la información necesaria para la estandarización y modernización de los planes de mantenimiento ferroviario.

Las infraestructuras ferroviarias se caracterizan por ser sistemas altamente robustos, complejos y críticos, diseñados para operar bajo condiciones exigentes de seguridad, disponibilidad y continuidad del servicio. Esta naturaleza sistémica convierte su estudio y gestión en un campo inherentemente multidisciplinario, en el que convergen diversas ramas de las ciencias aplicadas. No obstante, desde la perspectiva de la ingeniería del mantenimiento, dicha multidisciplinariedad adquiere un carácter singular, ya que cada especialidad técnica — mecánica, eléctrica, electrónica, electromecánica, telecomunicaciones y sistemas de control— requiere enfoques, criterios y estrategias de mantenimiento específicos, adaptados a la funcionalidad y criticidad de sus activos. En este sentido, el mantenimiento ferroviario se consolida como un ámbito integrador, capaz de articular estas disciplinas bajo una metodología común, sin perder la especificidad técnica que caracteriza a cada una de ellas.

## Recomendaciones

Desde una perspectiva de ingeniería electrónica, se recomienda fortalecer el uso de sistemas de adquisición y procesamiento inteligente de señales, tales como vibraciones, señales acústicas, imágenes y variables eléctricas, con el fin de extraer características relevantes que superen las limitaciones de los enfoques tradicionales basados en umbrales fijos. Este enfoque permite el desarrollo de modelos adaptativos más robustos frente a la variabilidad operacional propia de los sistemas ferroviarios.

Se sugiere que futuras implementaciones metodológicas incorporen arquitecturas de monitoreo basadas en telemetría y sistemas SCADA integrados con CMMS, de manera que la información generada por los sistemas electrónicos de campo se traduzca directamente en indicadores de desempeño (KPI) y en decisiones de mantenimiento más oportunas y fundamentadas.

A partir del estado del arte revisado, se recomienda avanzar progresivamente hacia la integración de técnicas de Inteligencia Artificial y analítica avanzada de datos como complemento a los planes de mantenimiento estructurados, priorizando aplicaciones orientadas a la predicción de fallas, la estimación de vida útil remanente y la optimización de recursos de mantenimiento.

Finalmente, se recomienda que tanto el sector académico como el industrial y el sector ferroviario, naciente en Colombia, promuevan un enfoque interdisciplinario en el diseño de estrategias de mantenimiento en el cual la ingeniería electrónica no solo cumpla un rol instrumental, sino que actúe como un habilitador estratégico para la digitalización, estandarización y sostenibilidad de los procesos de mantenimiento en la infraestructura ferroviaria, La creación y consolidación de equipos de trabajo altamente capacitados y

competentes es un factor determinante para garantizar la sostenibilidad, la seguridad operativa y la competitividad de las infraestructuras ferroviarias y de los procesos industriales en general.

### Referencias Bibliográficas

- AENOR. (2019). UNE-EN 17023:2019. Aplicaciones ferroviarias. Mantenimiento del material rodante. Creación y modificación del plan de mantenimiento. Asociación Española de Normalización.
- Arcieri, G., Hoelzl, C., Schwery, O., Straub, D., Papakonstantinou, K. G., & Chatzi, E. (2023). Bridging POMDPs and Bayesian decision making for robust maintenance planning under model uncertainty: An application to railway systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 239, 109496. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109496>
- ASHRAE. (2021). ASHRAE Standards and Guidelines. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Besinovic, N., De Donato, L., Flammini, F., Goverde, R. M. P., Lin, Z., Liu, R., Marrone, S., Nardone, R., Tang, T., & Vittorini, V. (2022). Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations, and Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 14011-14024. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3131637>
- Binder, M., Mezhyuev, V., & Tschandl, M. (2023). Predictive Maintenance for Railway Domain: A Systematic Literature Review. *IEEE Engineering Management Review*, 51(2), 120-140. <https://doi.org/10.1109/EMR.2023.3262282>
- Bressi, S., Santos, J., & Losa, M. (2021). Optimization of maintenance strategies for railway track-bed considering probabilistic degradation models and different reliability levels. *Reliability Engineering & System Safety*, 207, 107359. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107359>

- British Standards Institution. (2008). PAS 55: Asset Management - Specification for the optimized management of physical assets. BSI.
- BSI. (2015). Guide to Publicly Available Specifications (PAS). British Standards Institution.
- Castellani, M., García-Macías, E., Meoni, A., & Ubertini, F. (2025). Fast deformation assessment of riveted steel railway bridges during load testing using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Measurement*, 253, 117412.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117412>
- CEN. (2007). EN 15085. Railway applications – Welding of railway vehicles and components. European Committee for Standardization.
- CEN. (2013). EN 45545. Railway applications – Fire protection on railway vehicles. European Committee for Standardization.
- CEN. (2016). EN 15313. Railway applications – In-service wheelset maintenance. European Committee for Standardization.
- CEN. (2017). EN 14033-1. Railway applications – Track machines – Technical requirements for running. European Committee for Standardization.
- CENELEC. (2017). *EN 50126-1: Railway applications — The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*. European Committee for Electrotechnical Standardization.
- Consilvio, A., Febbraro, A. D., & Sacco, N. (2021). A Rolling-Horizon Approach for Predictive Maintenance Planning to Reduce the Risk of Rail Service Disruptions. *IEEE Transactions on Reliability*, 70(3), 875-886. <https://doi.org/10.1109/TR.2020.3007504>

- Costa, M. A., Alves, T. P., Andrade, A. R., & Corman, F. (2024). A hybrid maintenance approach for key components of the train bogie to optimize fleet availability. *Engineering Failure Analysis*, *165*, 108815. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108815>
- Damián, R., & Zamorano, C. I. (2022). Environmental impact assessment of high-speed railway tunnel construction: A case study for five different rock mass rating classes. *Transportation Geotechnics*, *36*, 100817. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100817>
- Donato, L. D., Flammini, F., Marrone, S., Mazzariello, C., Nardone, R., Sansone, C., & Vittorini, V. (2022). A Survey on Audio-Video Based Defect Detection Through Deep Learning in Railway Maintenance. *IEEE Access*, *10*, 65376-65400. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183102>
- Edjeou, W., Moström, O., Asplund, M., Larsson-Kråik, P.-O., Pérez-Ràfols, F., Larsson, R., & Almqvist, A. (2025). Evaluating the impact of rail surface roughness post-grinding: An experimental and elastoplastic modelling approach. *Tribology International*, *201*, 110270. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110270>
- eMaint. (s. f.). *MTTF vs MTBF vs MTTR: explicación de las principales métricas de fallos*. <https://www.emaint.com/es/mtbf-mttf-mttr-maintenance-kpis/>
- European Committee for Standardization. (2017). EN 50126-1: Railway applications - The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). CEN.
- Feng, D., Sun, X., Shang, C., Li, N., Lin, S., & He, Z. (2022). Cost-Effectiveness Oriented Intelligent Maintenance Scheduling Optimization for Traction Power Supply System of High-Speed Railway. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *23*(12), 23179-23193. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3191998>

- Fernandez-Bobadilla, H. A., & Martin, U. (2023). Modern Tendencies in Vehicle-Based Condition Monitoring of the Railway Track. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 72, 1-44. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3243673>
- Guan, K., Guo, X., He, D., Svoboda, P., Berbineau, M., Wang, S., Ai, B., Zhong, Z., & Rupp, M. (2024). Key technologies for wireless network digital twin towards smart railways. *High-speed Railway*, 2(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2024.01.004>
- IBM. (s. f.). *¿Qué es el mantenimiento centrado en la confiabilidad?* <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/reliability-centered-maintenance>
- IBM. (s. f.). *¿Qué es el mantenimiento preventivo?* <https://www.ibm.com/es-es/topics/what-is-preventive-maintenance>
- International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000: Asset Management - Overview, Principles and Terminology. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/iso:std:iso:55000:ed-1:v2:es>
- ISO. (2014). *ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2019). *ISO 55010: Guidance on alignment of asset management, finance and accounting*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2020). About ISO. International Organization for Standardization.
- Ivina, D., & Palmqvist, C.-W. (2023). Railway maintenance windows: Discrepancies between planning and practice in Sweden. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 22, 100927. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100927>
- Iwnicki, S., Spiryagin, M., Cole, C., & McSweeney, T. (2020). *Handbook of railway vehicle dynamics* (2.<sup>a</sup> ed.). CRC Press

[https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780429890635\\_A38917913/preview-9780429890635\\_A38917913.pdf](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780429890635_A38917913/preview-9780429890635_A38917913.pdf)

Jiang, K., Tian, Z., Wen, T., Hillmansen, S., & Zhang, Y. (2024). Cost modelling-based route applicability analysis of United Kingdom passenger railway decarbonization options.

*International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 160, 110094.

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110094>

Kang, R., Wang, J., Chen, J., Zhou, J., Pang, Y., & Cheng, J. (2021). Analysis of Failure

Features of High-Speed Automatic Train Protection System. *IEEE Access*, 9, 128734-

128746. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3113381>

Karaduman, G., & Akin, E. (2022). A New Approach Based on Predictive Maintenance Using

the Fuzzy Classifier in Pantograph-Catenary Systems. *IEEE Transactions on Intelligent*

*Transportation Systems*, 23(5), 4236-4246. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3042997>

Kelly, A. (2006). *Maintenance strategy: Business-centred maintenance*. Butterworth-

Heinemann.

Kelly, A., & Harris, M. (2011). *Management of Industrial Maintenance*. Butterworth-

Heinemann.

Koohmishi, M., Kaewunruen, S., Chang, L., & Guo, Y. (2024). Advancing railway track health

monitoring: Integrating GPR, InSAR and machine learning for enhanced asset

management. *Automation in Construction*, 162, 105378.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105378>

Li, P., Long, Z., & Yang, Z. (2021). RF Energy Harvesting for Batteryless and Maintenance-Free

Condition Monitoring of Railway Tracks. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), 3512-

3523. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3023475>

- Li, S., Lang, M., Li, S., Chen, X., Yu, X., & Geng, Y. (2022). Optimization of High-Speed Railway Line Planning With Passenger and Freight Transport Coordination. *IEEE Access*, *10*, 110217-110247. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3210578>
- Lin, S., Fan, R., Feng, D., Yang, C., Wang, Q., & Gao, S. (2022). Condition-Based Maintenance for Traction Power Supply Equipment Based on Partially Observable Markov Decision Process. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *23*(1), 175-189. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3009175>
- Lin, S., Shang, C., Li, N., Sun, X., Feng, D., & He, Z. (2023). An Optimization Method for Maintenance Resource Allocation in Electrified Railway Catenary Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *59*(1), 641-651. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3217107>
- Logicbus. (s. f.). *Mantenimiento predictivo y monitoreo en tiempo real en la industria ferroviaria*. <https://www.logicbus.com.mx/blog/mantenimiento-predictivo-y-monitoreo-en-tiempo-real-en-la-industria-ferroviaria/>
- Mei, S., Wang, H., Diao, Z., Zhang, J., Shen, H., & Wen, G. (2025). STCD-Net: A Novel Change Detection Architecture for Anomaly Detection on High-Speed Train Body in Railway Maintenance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *74*, 1-13. <https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3544754>
- Mordia, R., & Verma, A. K. (2025). Nondestructive testing methods for rail defects detection. *High-speed Railway*, *3*(2), 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2025.03.001>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance (RCM II)*. Industrial Press Inc. <https://www.iranrpm.ir/wp-content/uploads/2013/11/Reliability-Centered-Maintenance-II.pdf>

- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance (RCM II)*. Industrial Press.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to Total Productive Maintenance (TPM)*. Productivity Press.
- NFPA. (s.f.). NFPA 130 Desarrollo de la Norma. NFPA. <https://www.nfpa.org/es/codes-and-standards/nfpa-130-standard-development/130>
- Padovano, A., Longo, F., Manca, L., & Grugni, R. (2024). Improving safety management in railway stations through a simulation-based digital twin approach. *Computers & Industrial Engineering*, 187, 109839. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109839>
- Petchrompo, S., Modhara, S., Kirwan, A., Parlikad, A. K., & Wattanapongsakorn, N. (2024). A two-step post-optimality approach for a multi-objective railway maintenance planning problem. *Computers & Industrial Engineering*, 192, 110207. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110207>
- Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). *Maintenance: An evolutionary perspective*. Springer.
- Poyyamozhi, M., Devadharshini, A. S. K., Murugesan, B., Novak, T., Mlcak, T., & R, N. (2024). Enhancing railway track maintenance with real-time ultrasonic and moisture sensing: Proactive and zone-specific management strategies. *Results in Engineering*, 24, 103472. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103472>
- Ramos, A., Correia, A. G., Nasrollahi, K., Nielsen, J. C. O., & Calçada, R. (2024). Machine Learning Models for Predicting Permanent Deformation in Railway Tracks. *Transportation Geotechnics*, 47, 101289. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101289>
- Sedghi, M., Kauppila, O., Bergquist, B., Vanhatalo, E., & Kulahci, M. (2021). A taxonomy of railway track maintenance planning and scheduling: A review and research trends. *Reliability Engineering & System Safety*, 215, 107827. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107827>

- Sedghi, M., Kauppila, O., Bergquist, B., Vanhatalo, E., & Kulahci, M. (2021). A taxonomy of railway track maintenance planning and scheduling: A review and research trends. *Reliability Engineering & System Safety*, *215*, 107827. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107827>
- Shaikh, M. Z., Ahmed, Z., Chowdhry, B. S., Baro, E. N., Hussain, T., Uqaili, M. A., Mehran, S., Kumar, D., & Shah, A. A. (2023). State-of-the-Art Wayside Condition Monitoring Systems for Railway Wheels: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, *11*, 13257-13279. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3240167>
- Shi, J., Li, H., & Vansteenwegen, P. (2024). Joint optimization of train platforming and shunting with service scheduling at a railway hub. *Computers & Industrial Engineering*, *197*, 110544. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110544>
- Shimizu, M., Perinpanayagam, S., Namoano, B., & Starr, A. (2023). Real-Time Prognostics and Health Management Without Run-to-Failure Data on Railway Assets. *IEEE Access*, *11*, 28724-28734. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3259221>
- Smith, R., & Hawkins, B. (2004). *Lean Maintenance*. Elsevier. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/47868/1/Gesti%C3%B3n%20de%20Mantenimiento.%20Lean%20Maintenance%20y%20TPM.pdf>
- SMRP (Society for Maintenance & Reliability Professionals). (2019). *Body of Knowledge for Maintenance and Reliability*.
- Stelorder. (s. f.). *Mantenimiento correctivo*. <https://www.stelorder.com/blog/mantenimiento-correctivo/>

- Sun, Y., Zhou, J., Sun, Z., & Wei, Z. (2024). Selective Maintenance for a Multistate System Considering Energy Loss and Environmental Effect. *IEEE Access*, *12*, 77079-77091. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3405329>
- TecnitexFire. (2022, 11 de octubre). Qué son las normas NFPA y diferencias con las normas UNE o EN. TecnitexFire. <https://tecnitexfire.com/blog/que-son-las-normas-nfpa-diferencias-con-normas-une-o-en/>
- Tecnosinergia S. de R. L. de C. V. (2016, 25 de octubre). *National Fire Protection Association (NFPA)*. Centro de Ayuda Tecnosinergia. <https://tecnosinergia.zendesk.com/hc/es/articles/231261268-National-Fire-Protection-Association-NFPA>
- Torzoni, M., Tezzele, M., Mariani, S., Manzoni, A., & Willcox, K. E. (2024). A digital twin framework for civil engineering structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *418*, 116584. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116584>
- UIC. (2018). UIC Leaflets and International Railway Standards. Union Internationale des Chemins de fer.
- Wireman, T. (2010). *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*. Industrial Press.

## Apéndices

### Apéndice A

*Plan de Mantenimiento de CAF para Trenes*

<https://drive.google.com/file/d/1iaKH9HtMo6QnXFZAKQjHsvzDxJlqYQj1/view?usp=s>

[haring](#)

**Apéndice B**

*Manual de Mantenimiento de Sistema de Freno de Tren CAF*

<https://drive.google.com/file/d/1oGVgTS5BjmpDEYTILO1J53YopPatTfUF/view?usp=s>  
[haring](#)

## Apéndice C

*Manual Descriptivo de Sistema de Freno de Tren CAF Colombia*

[https://drive.google.com/file/d/1ltg70MMHJfevFt6qBttjET7U9K1c8RML/view?usp=sha  
ring](https://drive.google.com/file/d/1ltg70MMHJfevFt6qBttjET7U9K1c8RML/view?usp=sharing)

**Apéndice D**

*Plan de Mantenimiento de GMQ Sistema de Climatización para el Metro de Quito*

[https://drive.google.com/file/d/16LVCJ7iHGnoAWyx\\_5\\_o93b3j3V\\_dFz8T/view?usp=sh  
aring](https://drive.google.com/file/d/16LVCJ7iHGnoAWyx_5_o93b3j3V_dFz8T/view?usp=sharing)

**Apéndice E**

*Ficha de Mantenimiento Inspección Quincenal de SET para SIEMENS Metro de Quito*

<https://drive.google.com/file/d/1WZH9I5p0GDhvHPIU6rganALqreywOvIE/view?usp=s>  
[haring](#)