

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE GESTIÓN TECNOLÓGICA EN LA
NUBE UTILIZANDO ANALÍTICA DE DATOS PARA EL AUMENTO DE LA
PRODUCTIVIDAD DE SISTEMAS FERROVIARIOS**

MARÍA JOSÉ LÓPEZ ABELLO

DANIEL HURTADO LÓPEZ

SANTIAGO ARANGO ARANGO

SEBASTIÁN DUQUE LOTERO

ALEJANDRO ARANGO GIRALDO

Trabajo de anteproyecto

Avance final

Leonel Francisco Castañeda Heredia

Profesor

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2023**

CONTENIDO

Pág.

1. IDENTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	4
2. RESUMEN EJECUTIVO	4
3. ANTECEDENTES	6
4. ANÁLISIS DE PARTICIPANTES	10
5. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	13
5.1. PROBLEMA CENTRAL.....	13
5.2. ÁRBOL DE PROBLEMAS	13
5.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y LA SITUACIÓN EXISTENTE	14
5.4. MAGNITUD ACTUAL DEL PROBLEMA: INDICADORES DE REFERENCIA	18
6. ESTADO DEL ARTE.....	47
6. ANÁLISIS DE OBJETIVOS	61
8. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	62
9. OBJETIVOS	69
6.1. OBJETIVO GENERAL	69
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	69
10. ESTRUCTURA ANALÍTICA DEL PROYECTO	70
11. PRODUCTOS ESPERADOS	73
12. METODOLOGÍA	74
13. MATRIZ DE MARCO LÓGICO	86
14. IMPACTOS.....	87
15. ESTRATEGIA DE DIFUSIÓN	89
16. CRONOGRAMA.....	90
17. PRESUPUESTO	91
18. EVALUACIÓN FINANCIERA	94
19. BIBLIOGRAFÍA.....	102

1. IDENTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

- **Título de la propuesta:**

Implementación de una plataforma de gestión tecnológica en la nube utilizando analítica de datos para el aumento de la productividad de sistemas ferroviarios.

- **Nombre de la entidad proponente y demás entidades:**

- **Nombre entidad proponente:** Universidad EAFIT
- **Nombre de la entidad aliada No. 1:** Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada – Metro de Medellín Ltda.

- **Localización (foco de la propuesta):**

Región: Andina

Departamento: Antioquia

Municipio(s): Área metropolitana del Valle de Aburrá

Centro poblado: Urbano

Resguardo: N/A

- **Lugar de ejecución:** Área metropolitana del Valle de Aburrá

- **Duración:** 24 meses

- **Conformación del equipo de trabajo:** Para el proyecto se realizará una alianza con la empresa Metro de Medellín Ltda.

Nombre	Dedicación (horas/semana)	Numero de meses	Función en el proyecto	Entidad a la que pertenece
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro	48	13	Estructurar sistema de gestión de activos y diseño, gestión y ejecución de pruebas.	Universidad EAFIT
Ingeniero en ciencias computacionales	48	10	Programación de la plataforma y sistema de recomendación por machine learning.	Universidad EAFIT
Administrador tecnológico	48	9	Organizar, controlar y evaluar los procesos de gestión tecnológica.	Universidad EAFIT
Técnico en TICs	48	8	Apoyo en las actividades del proyecto	Universidad EAFIT

Coordinador técnico	24	24	Coordinación de esfuerzos en los equipos de trabajo	Universidad EAFIT
Gerente de proyectos	6	24	Supervisión general del proyecto.	Universidad EAFIT
Coordinador técnico	48	24	Coordinación de esfuerzos en los equipos de trabajo y gestión logística para el apoyo de actividades conjuntas entre el Metro de Medellín y la Universidad EAFIT.	Metro de Medellín
Conductor de Metro	48	1	Apoyo en la ejecución de pruebas.	Metro de Medellín
Técnico de mantenimiento	48	1	Apoyo en la ejecución de pruebas.	Metro de Medellín
Operador del Puesto Central de Control	48	1	Apoyo en la ejecución de pruebas.	Metro de Medellín

Alineación con la política pública

Objetivos de Desarrollo sostenible

El proyecto aportará a la consecución de los ODS 7, 8, 9, 11 y 12 [1].

Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.

- **7.3** De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- **7.a** De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias
- **7.b** De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo

Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.

- **8.2** Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra.
- **8.4** Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados.

Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomenta la innovación.

- **9.2** Promover una industrialización inclusiva y sostenible y, de aquí a 2030, aumentar significativamente la contribución de la industria al empleo y al producto interno bruto, de acuerdo con las circunstancias nacionales, y duplicar esa contribución en los países menos adelantados.
- **9.4** De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.

Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.

- **11.2** De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las

personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad.

- **11.6** De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.

Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

- **12.2** De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
- **12.a** Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles.

Entre todos los objetivos mencionados, el objetivo de enfoque será el **8.2**. Este cuenta con el siguiente indicador:

8.2.1 Tasa de crecimiento anual del PIB real por persona empleada.

Plan Nacional de Desarrollo:

“Pacto por Colombia, pacto por la equidad 2018 -2022” [2]

- **Pacto:** “Pacto por el transporte y la logística para la competitividad y la integración regional”.
- **Objetivo:** Objetivo C: “Sistemas inteligentes, análisis y gobernanza de la información para la gestión del transporte y del tránsito”.
- **Estrategia:** “Fortalecer los sistemas inteligentes de transporte – SIT, análisis y gobernanza de la información, teniendo en cuenta plataformas actuales e interoperabilidad, métodos alternativos de obtención y generación de información y la infraestructura tecnológica necesaria para la competitividad”.

“Colombia, potencia mundial de la vida 2022-2026” [3]

- **Pacto:** “Ascenso tecnológico del sector transporte y promoción de la movilidad activa”.
- **Objetivo:** Objetivo d: “Modos de transporte más eficientes a escala operativa y energética”.
- **Estrategia:** “Se priorizarán y desarrollarán en la red de infraestructura nacional proyectos férreos, acuáticos y aéreos que por sus características operativas reduzcan emisiones contaminantes y costos logísticos y de transporte.”.

Plan Departamental de Desarrollo:

Unidos Por La Vida 2020-2023 [4]

- **Estrategia del Plan de Desarrollo Departamental:** busca ampliar y mejorar la infraestructura del transporte logísticamente, mejorando la eficiencia y la integración de los sistemas de movilidad.

- **Programa del Plan de Desarrollo Departamental:** Fomento y promoción de la infraestructura férrea y logística de Antioquia y su conectividad.

Plan Municipal de Desarrollo:

Medellín Futuro 2020-2023 [5]

- **Estrategia del Plan de Desarrollo Municipal:** soluciones tecnológicas, como los sistemas de transporte inteligentes (ITS), para mejorar el control, planificación, eficiencia y sostenibilidad del transporte.
- **Programa del Plan de Desarrollo Municipal:** Eco ciudad.

2. RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto plantea la implementación de una plataforma de gestión tecnológica en la nube que permita la integración de servicios de monitoreo y diagnóstico para el incremento de la productividad en sistemas ferroviarios. Por medio del análisis de datos e IoT, se estructurará una plataforma que integre y analice la información producida por los servicios de monitoreo y diagnóstico de condición, para la generación de indicadores KPI a corto y largo plazo que faciliten y optimicen la gestión de activos dentro de la empresa. El proyecto es propuesto por la Universidad EAFIT para beneficio del Metro de Medellín y con la financiación del CIDT.

La problemática que se busca resolver es la reducida productividad de los sistemas ferroviarios como consecuencia de una inadecuada gestión tecnológica producto de la independencia en los subsistemas técnicos, y su consecuente dificultad en la integración y análisis de información para la toma de decisiones informadas a nivel administrativo. El adecuado funcionamiento de las redes ferroviarias y la prestación del servicio de transporte recae en la coordinación de la disponibilidad del grupo de activos que forman parte de la infraestructura ferroviaria, material rodante y sistemas de control. Estos grupos de activos son administrados como bloques o “silos” independientes, pues su naturaleza descentralizada se origina en la oferta de soluciones genéricas del mercado, las cuales son incompatibles informáticamente debido a la diferencia en sus sistemas y métodos [6]. La falta de unificación en subsistemas como el energético, señalización y telecomunicaciones, mantenimiento, control de operaciones, ambiental, entre otros, produce ineficiencias en la toma de decisiones tanto en el Puesto Central de Control como en los otros sectores técnicos del sistema ferroviario. Adicionalmente, la ausencia de un sistema interconectado de información proveniente de estas diferentes fuentes dificulta considerablemente la selección, compilación y evaluación de métricas e indicadores clave de rendimiento para su comunicación y análisis en la dirección y gestión general del metro.

La solución propuesta consiste en la implementación de una plataforma para la gestión del rendimiento de los activos de monitoreo y diagnóstico (APM por sus siglas en inglés) en cumplimiento con la norma ISO 55000 y en concordancia con el sistema de gestión de activos empresariales (EAM). APM es una función clave de la gestión de activos que mide la eficacia y la eficiencia de los procesos subyacentes centrales de los activos: operaciones, mantenimiento y planificación de renovación [7]. La norma ISO 55000 especifica los requisitos para el establecimiento, implementación, mantenimiento y mejora de un sistema de gestión de activos [8]. La plataforma planteada integrará, procesará y relacionará la información producida por las tecnologías empleadas para el monitoreo y diagnóstico de condición de los diferentes componentes funcionales del material rodante; más específicamente, del subsistema de bogies. La aplicación permitirá la generación de indicadores KPI y recomendaciones apoyadas en la analítica de datos e IA para la optimización de la calidad y utilización de activos como los rodamientos, ruedas, suspensión, etc. a lo largo de su ciclo de vida. La construcción del programa será un esfuerzo colaborativo con el Metro de Medellín para producir una plataforma estándar que pueda ser empleada en la gestión de activos de diferentes subsistemas. Esto, por medio de soluciones tecnológicas de monitoreo y diagnóstico, incluso si estas son genéricas e independientes, y su implementación es paulatina. En otras palabras, si las soluciones son individuales y descentralizadas, y son adquiridas en diferentes períodos de tiempo, cada activo será integrado al flujo de información unificado para su adecuada gestión.

La propuesta se desarrolla con el objetivo principal de optimizar operacional y productivamente el metro por medio de la adecuada gestión de activos y, en consecuencia, aumentar su competitividad. Como primer acercamiento, la implementación del SKF Insight Rail permitiría hacer un monitoreo a tiempo real de la condición de los diferentes componentes de los bogies. De esta manera, se pueden anticipar problemas antes

de la falla, optimizando la programación del mantenimiento y disfrutando de un mayor intervalo entre estos, lo que, como resultado, reduce los costos de mantenimiento y ciclo de vida, las paradas no planificadas y los tiempos de inactividad [8]. Por su parte, la plataforma de gestión tecnológica inicialmente unificaría los canales de datos de los activos de monitoreo para el análisis simultáneo y centralizado de la información, y, con base en esto, brindar recomendaciones generadas por una inteligencia artificial que guíen la toma de decisiones. El APM se desarrollaría a lo largo de todo el ciclo de vida de los activos, aumentando la transparencia, colaboración y comunicación entre funciones y mejorando la eficiencia, disponibilidad, confiabilidad, capacidad de mantenimiento y valor general del ciclo de vida de los activos mientras reduce el tiempo de inactividad [10]. Asimismo, la relación entre los KPIs y los objetivos comerciales sería un puente entre el nivel técnico y el administrativo, brindando información valiosa para valorar el rendimiento actual y estimar el futuro. Este proyecto, en su conjunto, aportaría considerablemente a la consecución de los ODS 7, 8, 9, 11, 12 y 13, favoreciendo a los habitantes de las ciudades beneficiarias.

La exitosa puesta en marcha de la propuesta resultaría en la implementación de una plataforma de gestión de activos de alta eficiencia en el subsistema de bogies gracias a la integración del servicio de monitoreo y diagnóstico de condición SKF Insight Rail. Favoreciendo así el seguimiento del desempeño de activos para la evaluación y toma de decisiones a nivel administrativo con base en indicadores de rendimiento, y evidenciando impactos positivos en ámbitos como el medio ambiente y sociedad, productividad y competitividad, ciencia y tecnología, entre otros. Dentro de los 24 meses de duración del proyecto, se generan 5 productos: 1 documento de investigación de gestión de activos, 1 software de gestión de activos, 1 plataforma de gestión de activos, 1 documento de investigación de pruebas de la plataforma, y 1 registro de software para la plataforma.

La difusión del proyecto se realiza por medio de una ponencia en la Universidad EAFIT, la participación en las ferias ferroviarias de NT Expo e InnoTrans, la articulación a la Unión Internacional de Ferrocarriles, y la presentación de los resultados al ministerio de transporte. El proyecto requiere una inversión inicial de \$737'898.112, donde la Universidad EAFIT aportará el 13.00%, el Metro de Medellín el 5.27%, y el CIDT el \$81.71%. La retribución a la inversión del proyecto se presenta a partir del año 2 después de ser implementado el proyecto.

El proyecto es presentado por los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad EAFIT; María José López, Daniel Hurtado, Santiago Arango, Sebastián Duque y Alejandro Arango en alianza con la Universidad EAFIT y la empresa Metro de Medellín Ltda.

3. ANTECEDENTES

El Metro de Medellín es el principal medio de transporte público del Valle de Aburrá, movilizando alrededor de 800.000 personas diariamente en 2019 [11] y funcionando como la arteria principal que conecta el Área Metropolitana. A medida que la población y la responsabilidad ambiental aumenta, la necesidad de innovación toma gran relevancia. El metro, como parte de su plan de acción 2021-2025 [12], se plantea objetivos como la contribución con la agenda 2030 de los ODS en el área de sostenibilidad, maximizar ingresos tarifarios en el área de gestión financiera, alcanzar 1.3 millones de viajes en DTL en el área de ciudadanía y territorio, fortalecer el ecosistema de innovación y gestión de activos para el área de procesos e innovación, y potenciar la gestión estratégica del talento humano para el área de aprendizaje y crecimiento. Este es solo un ejemplo de los muchos sistemas de transporte masivo que se encuentran en un proceso de adaptación a los nuevos desafíos de una siempre cambiante industria.

Enfrentados a estos retos, es imperante adaptar tecnologías que contribuyan al cumplimiento de estos. Sin embargo, las soluciones ofrecidas por el mercado son descentralizadas y específicas a una función, volviendo ineficiente la gestión de activos ferroviarios. Por tanto, para lograr los objetivos planteados, debe establecerse un puente que integre las diferentes tecnologías, centralice el flujo de información y conecte el nivel técnico con el administrativo por medio de métricas representativas cuantificables y evaluables. El proyecto planteado integrará la información producida por los servicios de monitoreo y diagnóstico de activos y la convertirá en indicadores de rendimiento (KPI) que iluminen el camino para lograr estas metas. En pocas palabras, una gestión tecnológica óptima y el monitoreo de su rendimiento con KPIs es una estrategia adecuada para afrontar el plan de acción 2021-2025.

La gestión tecnológica consiste en la planificación, diseño, optimización, operación y control de los productos, procesos y servicios técnicos. Es una colección de prácticas de gestión para integrar sus aspectos técnicos básicos y obtener una ventaja competitiva.

Un marco tecnológico correctamente integrado y gestionado puede ayudar a optimizar operaciones y su eficiencia, mejorar la comunicación para ayudar a tomar decisiones mejor informadas. No se trata solo de implementar tecnologías, sino también de garantizar que esta se integre sin problemas con los procesos, sistemas y tecnologías ya aplicadas. El objetivo final de la gestión e integración de la tecnología es crear un ecosistema tecnológico optimizado, eficiente, seguro y adaptable que respalte los objetivos estratégicos y las necesidades operativas de la organización por medio de monitoreo, diseño de estrategias, adaptación, selección, desarrollo y planificación de tecnologías disponibles [13].

KPI (Key Performance Indicators, en español Indicadores Claves de Rendimiento), son métricas cuantificables que reflejan el rendimiento de una organización, equipo, empleado e incluso una acción específica o proyecto, en relación con ciertos objetivos y metas ya establecidas. Son utilizados para entender el rendimiento y éxito de una entidad en áreas específicas siempre y cuando sean medibles, relevantes y vinculados a los objetivos estratégicos con el fin de proporcionar información valiosa. Por ejemplo, en manufactura, los KPI pueden ser la eficiencia de producción, el tiempo de inactividad de la maquinaria, el índice de defectos, etc.

Existen diferentes tipos de KPI que son usados dependiendo de la empresa, los objetivos y sector en que se desarrolla el proyecto: de ventas, que miden el nivel de compras y aspectos relacionados a las ventas de un producto; de redes sociales, buscan medir el engagement o impacto de una campaña en redes sociales además del retorno de inversión; de logística, su fin es medir la productividad de diferentes procesos de un

negocio; de producción, esto se encargan de ayudar a la mejora de procesos teniendo en cuenta factores clave como la demanda; financieros, se enfocan en el crecimiento económico y reducción de costos o gastos; por último se encuentran de marketing digital que miden el rendimiento de campañas y que tanta influencia tiene en la audiencia [14][15].

KPI son implementados en proyectos como iNSPiRe (por Corredera, Álvaro; Macía, Andrés; Sanz, Roberto y Hernández, José L) que ha creado un sistema de seguimiento con productos comerciales adoptando una visión basada en la eficiencia energética para medir de manera sencilla el consumo de energía y los parámetros de comodidad en el hogar. Lo hace por medio de herramientas como FAR ECHO y plataformas de monitoreo y le permite al usuario visualizar KPI y otros datos de monitoreo de forma automática, normalmente sería necesario obtener estos manualmente. Inicialmente se define un sistema de monitoreo y frecuencia de toma de datos, luego se definen las variables a monitorear (comodidad interior, consumo térmico y energético, y condiciones climáticas) y así poder definir la base de datos que permite el monitoreo sincrónico de KPI y de datos, además de tareas asincrónicas basadas en temporizadores [16].

Además, se han implementado esquemas basados en datos para predicción y diagnóstico KPI a un proceso de enrolado de laminación en caliente en la industria de fabricación de acero (por Ding, Steven X; Yin, Shen; Peng, Kaixiang; Hao, Haiyang y Shen, Bo). El enfoque puede mejorar el rendimiento de la predicción y simplificar significativamente los pasos de cálculo necesarios involucrados en el diagnóstico. Para procesos dinámicos se utilizó LCF en un sistema basado en datos moda, para la predicción y el diagnóstico eficiente de KPI medibles y no medibles. La implementación de los KPI se hace en 4 pasos: primero se definen las características, beneficios y requerimientos del proceso, luego se seleccionan las variables responsables de lo antes mencionado para ser precedidas y evaluadas [17].

Una de las plataformas activas para la gestión y control de activos ferroviarios es Railigent X. Según el portafolio de productos digitales para el manejo de sistemas ferroviarios de Siemens [18], el sistema Railigent X es una suite de aplicaciones para el manejo de activos en la industria ferroviaria. Al ser una suite de aplicaciones, esta integra componentes y herramientas en una plataforma interconectada. Este sistema utiliza tecnología IA e IoT para obtener mejoras en la disponibilidad del sistema, optimizar procesos de mantenimiento, y reducir costos de operación. El sistema Railigent X funciona gracias a 5 estaciones fundamentales.

La primera estación se encarga de la adquisición de datos del sistema. Esto lo hace con tecnología de punta en sensorica, medidores, escáneres, y cámaras. En esta estación se capturan todos los datos que dan evidencia del estado del sistema. Ya sea, la condición de los rieles, la capacidad a la que están operando los trenes, vibraciones en los componentes mecánicos, etc. Todos estos sensores están conectados al centro de recopilación gracias a la tecnología IoT.

En la estación 2 todos los datos recopilados en la estación anterior migran a la nube de manera eficiente para poder ser procesados más adelante. Anteriormente, estos datos se mantenían cerrados por temas de seguridad, pero gracias a los avances en ciber seguridad, estos datos pueden subirse a la nube sin preocupación alguna.

Continuando con la estación 3, en donde se hace un filtrado y almacenado eficiente de los datos gracias a los avances en la tecnología de la computación en la nube. La infraestructura para el almacenamiento de datos de Railigent X está continuamente a la vanguardia de la tecnología por lo que se ahorran costos de adecuación de los servidores físicos. El sistema se encarga de limpiar y filtrar los datos para poder ser almacenados de la manera más optima posible. Esto es esencial para el correcto análisis de los datos.

En la estación 4 es donde el sistema toma todos estos datos que limpió, los cuales están almacenados en la nube, y los analiza con algoritmos complejos de IA. Estos algoritmos tienen la habilidad de reportar anomalías en el sistema antes de que estas lleven a un fallo, también tienen la habilidad de tomar decisiones inteligentes en el manejo logístico de los activos del sistema ferroviario.

Finalmente, en la estación 5, el sistema toma la información y las decisiones ideadas por los algoritmos de IA y se las presenta a los técnicos y operadores en forma de recomendaciones para así mejorar el funcionamiento general del sistema.

Siemens ha integrado en su aplicación suite Railigence X aplicaciones de socios estratégicos. Por ejemplo, SKF con sus aplicaciones SKF Insight; para el monitoreo constante del estado de juegos de ruedas, y SKF IMx-Rail; para monitorear ruedas, transmisiones y motores de tracción. Otro aliado es Strukton Rail con su sistema automático de reconocimiento de daños en la infraestructura de los rieles del tren, estas imágenes son procesadas por algoritmos de Computer Vision y alertan a los técnicos para llevar a cabo mantenimiento inteligente.

El sistema Railigent X fue implementado en 2018 en el Expreso Rhine-Ruhr en Alemania, esta zona presentaba problemas de movilidad por la sobrecarga constante del sistema público ferroviario. Siemens implementó el RRX (Rhine-Ruhr Express) y logró conectar Colonia, Dusseldorf y Ruhr, garantizó una disponibilidad del 99% y firmó un contrato de servicio a 32 años. Se introdujeron 84 trenes inteligentes, conectados por medio del sistema Railigent X. También fue implementado en el Reino Unido en el Govia Thameslink Railway. La ruta Thameslink en Londres es una de las más ocupadas y presentaba problemas con la confiabilidad del sistema. Al implementar este sistema, se logró por medio de la aplicación Train State Live, incluida en la suite de Railigent X, reducir los tiempos de retraso de los trenes. Se logró optimizar también el mantenimiento de estos trenes para mejorar la confiabilidad.

Controlguide Digital Station and Power Manager (DSPM) de Siemens es otra de las tecnologías empleadas para la gestión y control de activos en las estaciones de redes ferroviarias. Con base en el portafolio de Siemens Mobility [19], el DSPM funciona como el centro de control digital de estaciones y de la red de electrificación ferroviaria. Su servicio es escalable para proporcionar diferentes funciones de automatización como escaleras, ascensores, iluminación, ventilación, etc. Igualmente, permite el control remoto de instalaciones de electrificación como sistemas de catenaria o subestaciones de tracción. También, se conecta fácilmente con los sistemas de tráfico para proporcionar información completa y actualizada a los viajeros sobre el servicio del tren y las posibles interrupciones de este, por medio de paneles de vídeo, megafonía e interfaces para aplicaciones móviles. Proporciona funciones de seguridad avanzadas al integrar cámaras CCTV, control de acceso o sensores de intrusión en una sola consola.

Entre sus beneficios, el usuario recibe una experiencia de viaje mejorada gracias a los servicios de planificación e información de viajes para proporcionar al usuario advertencias sobre las interrupciones del servicio o la carga de pasajeros prevista del tren. Los operarios reciben una serie de herramientas que integran los sistemas de gestión de las estaciones y les permiten optimizar la utilización de la capacidad del tren, así como la reducción de tiempos de permanencia y paradas prolongadas no planificadas en las estaciones. Los dueños de los activos, en este caso las organizaciones que implementan esta tecnología experimentarían gastos de capital reducidos (CAPEX) en la compra, mejora y mantenimiento de los activos, y hasta un 20 % de ahorro en gastos operativos (OPEX) para mantener sus actividades comerciales en funcionamiento. Esto gracias al diseño modular y flexible del Digital Station Manager, los subsistemas optimizados, y el consumo de energía reducido [19].

Algunos de los lugares donde se ha implementado esta tecnología han sido la línea de 28 estaciones de Hong Kong, China; la línea 3 de 16 estaciones de Sofía, Bulgaria; las líneas 9 y 10 del metro de Barcelona, España; y las 57 estaciones del metro de Múnich, Alemania. Todos estos sistemas metro se han beneficiado significativamente de los beneficios del DSPM, demostrando la pertinencia de esta tecnología y el gran impacto positivo que pueden generar.

4. ANÁLISIS DE PARTICIPANTES

En esta sección, se van a identificar las personas o entidades que se relacionan y que intereses y expectativas tienen frente a la propuesta de proyecto dentro de las siguientes categorías.

- Ejecutor: la Universidad EAFIT actuaría como la entidad que va a llevar a cabo el proyecto
- Financiador: el centro tecnológico de innovación y desarrollo tecnológico (CIDT) sería la entidad financiadora, aportando recursos en efectivo para el desarrollo del proyecto.
- Autoridad: el ministerio de transporte y la secretaría de movilidad de Medellín serían las entidades de carácter autoritario con las cuales se desarrollará el proyecto.
- Beneficiario: Acá se encuentran principalmente la empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada (Metro de Medellín Ltda.). la cual será la entidad beneficiaria de los resultados del proyecto.
- Cooperante: El Ministerio del Interior, la Dirección Nacional de Derechos de Autor (DNDA), la Asociación Latinoamericana de Metros y Subterráneos (Alamys), la alcaldía de Medellín, EPM y el SIATA pueden aportar información para la gestión del conocimiento.
- Proveedor: la empresa SKF proveería la tecnología Insight Rail como parte de un contrato comercial de compraventa.
- Oponente: Estos pueden ser el sindicato de trabajadores y empleados del sistema de transporte del valle de aburra (Sintrametro) y la empresa que presta el servicio de integración de tecnologías actualmente.
- Perjudicado: Empleados del metro cuyas funciones serán automatizadas, y, por consiguiente, serán capacitados para desempeñar las nuevas funciones que se deriven de la implementación de las nuevas tecnologías.

Tabla 1. Análisis de participantes.

Datos de la entidad	Posición	Contribución o Gestión
Actor: Nacional Entidad: Universidad EAFIT Posición: Ejecutor Intereses o Expectativas: Ejecutar el proyecto.	Ejecutor	- Formular y ejecutar - Supervisar y realizar el seguimiento técnico y financiero del proyecto.
Actor: Nacional Entidad: CIDT Posición: Financiador Intereses o Expectativas: Aportar a proyectos de innovación y desarrollo tecnológico en el país.	Financiador	-Financiar necesidades de capital y activos fijos.
Actor: Departamental Entidad: Ministerio de transporte Posición: autoridad Intereses o Expectativas: avance tecnológico en los sistemas de transporte público de la ciudad.	Autoridad	- Vigilar que los resultados del proyecto cumplan con los estándares y regulaciones.

<p>Actor: Departamental Entidad: secretaría de movilidad de Medellín Posición: autoridad Intereses o Expectativas: obtención de información para un sistema de transporte público automatizado y optimizado.</p>	<p>Autoridad</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Datos de tránsito. -Gestión logística del proyecto.
<p>Actor: Departamental Entidad: Metro de Medellín Posición: Beneficiario Intereses o Expectativas: automatizar y canalizar todas las entradas de datos del sistema ferroviario.</p>	<p>Beneficiario</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Modificación de sus sistemas actuales. -Capacitar Personal. -Horas de ensayo en las líneas de tránsito.
<p>Actor: Nacional Entidad: Ministerio del Interior Posición: cooperante Intereses o Expectativas: mejora en la gestión de activos de sistemas de transporte público.</p>	<p>Cooperante</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Coordinación interinstitucional - Recursos intelectuales y gestión del conocimiento - Regulación y normativas relacionadas
<p>Actor: Nacional Entidad: DNDA Posición: cooperante Intereses o Expectativas: registro de software para una plataforma de integración de servicios digitales para la gestión de activos</p>	<p>Cooperante</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Propiedad intelectual y licencias de software
<p>Actor: Internacional Entidad: Alamys Posición: cooperante Intereses o Expectativas: avance tecnológico en la gestión de activos de sistemas ferroviarios</p>	<p>Cooperante</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Buenas prácticas para la implementación de la plataforma - Experiencia y conocimiento compartido - Estándares y normativas - Benchmarking y comparación entre los sistemas de gestión
<p>Actor: Municipal Entidad: Alcaldía de Medellín Posición: cooperante Intereses o Expectativas: recolección de información para la mejora del geoportal de Medellín</p>	<p>Cooperante</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Información de valor en el geoportal de Medellín

<p>Actor: Municipal Entidad: EPM Posición: cooperante Intereses o Expectativas: recolección de información para la mejora del geoportal de EPM</p>	<p>Cooperante</p>	<p>- Información de valor en el geoportal de EPM</p>
<p>Actor: Departamental Entidad: SIATA Posición: cooperante Intereses o Expectativas: recolección de información para la mejora del sistema de alerta temprana</p>	<p>Cooperante</p>	<p>- Información de valor recolectada por el sistema de alerta temprana</p>
<p>Actor: Internacional Entidad: SKF Posición: proveedor Intereses o Expectativas: venta del producto Insight Rail</p>	<p>Proveedor</p>	<p>-Hardware y software para implementación del sistema Insight Rail</p>

5. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

5.1.PROBLEMA CENTRAL

En el plan nacional de desarrollo para el periodo 2022-2026 se encuentra:

- Pacto: “Ascenso tecnológico del sector transporte y promoción de la movilidad activa”.
- Objetivo: Objetivo d: “Modos de transporte más eficientes a escala operativa y energética”.
- Estrategia: “Se priorizarán y desarrollarán en la red de infraestructura nacional proyectos férreos, acuáticos y aéreos que por sus características operativas reduzcan emisiones contaminantes y costos logísticos y de transporte”.

El ODS 8.2 tiene como objetivo lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra.

En el plan departamental de Antioquia se establece como objetivo mejorar la eficiencia e integración de los sistemas, mejorando y fomentando la infraestructura férrea del departamento y su conectividad.

Por otro lado, el plan municipal de Medellín se enfoca en el desarrollo de tecnologías inteligentes mejorando la operación y efectividad de los sistemas de transporte.

Partiendo de los anteriores objetivos de diferentes políticas públicas y el propósito de este proyecto, se tiene como problema central:

Baja productividad en sistemas ferroviarios debido a la inadecuada gestión de activos como consecuencia de la descentralización de los subsistemas.

5.2.ÁRBOL DE PROBLEMAS

Tabla 2. Árbol de problemas

Efectos Indirectos	1.1. Aumento en tareas redundantes 1.2. Bajo rendimiento del personal 1.3. Desfavorabilidad de la relación costo/beneficio	2.1. Deterioro de la reputación de la organización 2.2. Disminución del impacto positivo del servicio 2.3. Desaprovechamiento de tiempo y recursos 2.4. Falta de reconocimiento en el sector	3.1. Aumento del consumo material y de repuestos 3.2. Acortamiento del período útil de activos 3.3. Desaprovechamiento del ciclo de vida de los activos	4.1. Pérdida de confianza de los usuarios en el servicio 4.2. Disminución en el número de usuarios transportados diariamente 4.3. Aumento de incidentes e interrupciones	5.1. Disminución de ganancias por uso inefficiente de material rodante 5.2. Interrupciones frecuentes en la operación 5.3. Exceso de presión sobre activos y personal	6.1. Aumento en costos de consumo energético 6.2. Aumento de la huella de carbono 6.3. Falta de contribución a objetivos medioambientales	7.1. Desaprovechamiento de activos disponibles 7.2. Desmejora de la calidad del servicio y baja eficiencia	8.1. Falta de apoyo en la innovación tecnológica 8.2. Disminución de la actividad económica 8.3. Aumento de problemas persistentes de incompatibilidad 8.4. Limitación en la implementación de soluciones tecnológicas
	1. Disminución en la productividad operacional del sistema	2. Disminución en la competitividad de la empresa	3. Aumento en el costo de ciclo de vida de los activos	4. Disminución en la seguridad y la satisfacción del usuario	5. Disminución en la disponibilidad de los activos	6. Deterioro de la eficiencia energética en la operación y mantenimiento	7. Suboptimización del desempeño funcional del sistema	8. Falta de apoyo a la industrialización sostenible
Baja productividad en sistemas ferroviarios debido a la inadecuada gestión de activos como consecuencia de la descentralización de los subsistemas.								
Causas directas	1. Falta de sistemas de gestión de activos centralizados	2. Subdesarrollo y falta de adecuación de las TICs y recursos humanos	3. Ausencia de prácticas de monitoreo de condición y mantenimiento predictivo efectivas	4. Ineficiencia de los procesos operacionales y de mantenimiento	5. Falta de planeación del mantenimiento realizados sin considerar la condición real de los activos	6. Desuso de tecnologías de ahorro de energía y aumento del consumo	7. Descentralización en la supervisión y control de rendimiento	8. Baja inversión en la actualización y estandarización de las TICs
	1.1. Escasa inversión en tecnologías integrables que dificultan una gestión eficaz. 1.2. Descentralización y falta de una única plataforma de gestión 1.3. Carencia de normas y protocolos de interoperabilidad 1.4. Deficiencia en la coordinación y comunicación.	2.1. Inaptitud y fallo de procesos para compatibilidad 2.2. Uso de Soluciones tecnológicas obsoletas 2.3. Falta de capacitación en nuevas soluciones tecnológicas	3.1. Carencia de tecnologías de monitoreo de condición 3.2. Falta de indicadores de desempeño pertinentes 3.3. Desaprovechamiento de la gestión y almacenamiento de información	4.1. Falta de implementación de sistemas de gestión de calidad 4.2. Planificación inadecuada sin tener en cuenta la disponibilidad 4.3. Altos períodos de inactividad no planificada	5.1. Desconocimiento de períodos óptimos de mantenimiento 5.2. Falta de estrategias de mantenimiento y adquisición de repuestos no adecuados	6.1. Baja inversión en tecnología de ahorro energético 6.2. Personal no capacitado en tecnologías de ahorro 6.3. Falta de optimización del consumo basado en demanda	7.1. Falta de un sistema adecuado de gestión, almacenamiento y flujo de la información 7.2. Ausencia de métricas adecuadas para evaluar el rendimiento 7.3. Falta de protocolos de toma de decisiones óptimas	8.1. Desconocimiento en la organización acerca de los beneficios de la gestión tecnológica 8.2. Ausencia de políticas para la actualización tecnológica

5.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y LA SITUACIÓN EXISTENTE

En la actualidad, la industria ferroviaria se encuentra inmersa en un entorno de transformaciones y cambios significativos. Por un lado, enfrenta la imperiosa necesidad de adoptar prácticas más sostenibles y de reducir su consumo de energía y costos. Al mismo tiempo, debe mejorar el RAMS de sus activos, garantizando siempre el mejor servicio y comodidad para los usuarios. Ante la creciente variabilidad del contexto global y el exponencial incremento en la competitividad, surge la obligación de modernizar y adaptar la operación de la red ferroviaria para superar estos nuevos retos. En consecuencia, es esencial dar prioridad a las inversiones en cuatro pilares fundamentales: sostenibilidad, resiliencia, eficiencia y flexibilidad del sistema ferroviario [80].

La gestión de activos abarca cada uno de estos pilares. Esta tiene como objetivo garantizar que los activos funcionen según lo planeado dentro de los costos esperados, abarcando perspectivas financieras, de disponibilidad, de seguridad, de mantención, entre otros. Para ello, se emplean tres sistemas principales: Enterprise Asset Management (EAM) para registrar activos, sus relaciones y actividades de mantenimiento; Gestión del rendimiento de activos (APM), definiendo la estrategia de activos y el monitoreo de la condición

para reducir los costos de mantenimiento; y Planificación y gestión de inversiones de activos (AIP), alineando la estrategia de activos con los objetivos comerciales, gestionando costos, ingresos y carteras de riesgo [81].

En este orden de ideas, la sostenibilidad de los operadores ferroviarios en el actual contexto global depende directamente de la capacidad de optimizar la gestión de sus activos, tanto de infraestructura como de material rodante. No obstante, es común encontrar ineficiencias en la gestión de activos dentro de sistemas ferroviarios alrededor del mundo, en especial en Latinoamérica, debido a la descentralización de los subsistemas y la incompatibilidad informática de las soluciones tecnológicas implementadas. La causa principal de esta problemática corresponde a la aplicación de servicios genéricos y específicos para subsistemas particulares. Debido a los fondos reducidos y la falta de iniciativas de inversión en la modernización de las TIC de algunos operadores ferroviarios, la adopción de soluciones se ve limitado a productos individuales, provistos por empresas independientes. En consecuencia, las plataformas digitales que acompañan estos productos son incompatibles informáticamente, y ya que los protocolos de interoperabilidad de activos digitales son escasamente empleados, cada una de estas soluciones es empleada independientemente, disregando los subsistemas e impidiendo el enfoque de Sistemas de Sistemas (SoS) que puede resultar tan beneficioso en este contexto. La falta de integración lleva entonces a una gestión de activos incompleta, donde no se consideran las correlaciones entre los subsistemas. Al desconocer la vista global del sistema, se evalúa cada subsistema por separado y allí es donde se incurre en ineficiencias. Por un lado, los indicadores de rendimiento seleccionados para el análisis de cada subsistema ofrecen información insuficiente, no porque el KPI elegido no ofrezca información valiosa, sino porque no considera los efectos que pueden tener otros subsistemas en su rendimiento. Igualmente, el irregular entorno de trabajo de los sistemas ferroviarios, provisto de condiciones climáticas variables, demandas cambiantes, e imprevistos de todo tipo, lleva a la sobre dependencia en la toma de decisiones humana, la cual no es muy confiable al verse enfrentada a grandes volúmenes de datos. Finalmente, la exigüidad de tecnologías para la eficiencia energética y la reducción del consumo aporta a la mala gestión de activos y amplifica sus consecuencias.

Para lograr la excelencia operativa en la industria ferroviaria, es fundamental implementar una gestión de activos (AM) eficaz y eficiente. El AM se define como los esfuerzos coordinados de una organización para extraer valor de sus activos. Aprovechar la digitalización y la inteligencia artificial (IA) puede potenciar una estrategia de AM adecuada, contribuyendo a objetivos relacionados con la sostenibilidad, la eficiencia energética, la seguridad del transporte, la calidad de ciclo de vida, y el crecimiento económico. AM abarca varios aspectos, incluidos el negocio (correspondiente al AIP), las operaciones (correspondiente al EAM), y el mantenimiento (correspondiente al APM) [82]. La gestión del mantenimiento juega un papel fundamental en el cumplimiento de los requisitos de AM. Un APM adecuado da como resultado la optimización del ciclo de vida de la infraestructura al extender la vida útil y minimizar la interferencia operativa, aumentando así la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad. Para lograr esto, se requiere de un sistema de monitoreo de condición que le permita al personal de mantenimiento mejorar constantemente su comprensión del desempeño de la infraestructura. El resultado de este proceso se traduce en una estrategia de mantenimiento basado en la condición que permite aumentar la efectividad mientras se disminuyen los costos [83].

Los sistemas ferroviarios, que abarcan infraestructura y material rodante, son complejos desde el punto de vista tecnológico, operativo y de configuración debido a factores como numerosos subsistemas, distribución espacial de activos y múltiples partes interesadas. Para realizar una correcta gestión de activos, la infraestructura y flota de material rodante deben ser considerados como un Sistema de Sistemas (SoS), que comprende sistemas autónomos, diversos e interconectados unidos para lograr el comportamiento SoS previsto. Este enfoque de pensamiento sistémico permite una comprensión profunda de los comportamientos, la predicción y el ajuste futuro de los resultados de los sistemas complejos. También permite analizar vehículos (subsistemas) individuales como parte de una flota (SoS) con objetivos compartidos. La gestión de

un SoS de varios niveles requiere gestión de configuración (CM) para realizar un seguimiento de los cambios en cada componente y su interacción con el sistema de nivel superior [82].

CM es parte del APM y el EAM, y consiste en el monitoreo de cambios en las características del sistema. Este debe considerar que los componentes de SoS se encuentran en diferentes etapas de su ciclo de vida, lo que agrega valor al AM pues permite evaluar el impacto del activo en la organización desde la adquisición hasta la disposición. Este mismo análisis se puede realizar para el costo de ciclo de vida (LCCA) como parte del AIP.

En su conjunto, el APM, EAM y AIP hacen parte integral del concepto de gestión de activos aumentada (AAM). Esta estrategia implica la integración de estos tres sistemas de gestión de activos bajo el enfoque de SoS, así como la asistencia de IA para el análisis avanzado de información en sistemas de soporte de decisión (DSS). Sin embargo, la mayor barrera para el correcto funcionamiento del AAM es el problema central propuesto. La flota de material rodante es un SoS de componentes y subcomponentes heterogéneos con diferentes funciones y procesos de ciclo de vida. El comportamiento de cualquier componente dentro de este SoS influye en toda la estructura debido a las interacciones entre subsistemas. Para comprender el estado general del activo se necesita una plataforma común y distribuida donde se pueda integrar la información completa sobre operación, mantenimiento y condición de los activos. Es aquí donde encontramos el problema que representan las plataformas digitales incompatibles informáticamente. Y si a esto se le adiciona las condiciones variantes del clima, eventos, incidentes, flujo de personas, y demás, tenemos un gran volumen de datos proveniente de todo tipo de fuentes, sin un sistema que los relacione [82].

Los componentes de alto valor como los motores, compresores, juegos de ruedas, sistemas de freno, y baterías, se utilizan en diferentes vehículos a lo largo de su vida útil según los requisitos y la disponibilidad. Para predecir fallas en la flota, es importante predecir fallas en estos activos. Es valioso estudiar el ciclo de vida de estos componentes por medio de un monitoreo de condición para implementar una adecuada estrategia de mantenimiento. No obstante, es un desafío mantener y acceder al registro completo de operación y mantenimiento de estos activos debido a sus diferentes configuraciones en distintos momentos. El monitoreo de cada uno de estos activos representa un gran flujo de datos. Por una parte, datos fuera de línea, que consisten en registros de mantenimiento, historial de fallas y daños, registros de condiciones operativas, hora de llegada del tren, etc. Los desafíos relacionados a la gestión de dichos datos son la heterogeneidad de los datos, así como los problemas de calidad, limpieza, almacenamiento y recuperación asociados a estos. En el caso de los datos transmitidos en vivo, estos consisten en grandes volúmenes de datos de monitoreo de condición de sistemas a bordo y detectores en los rieles. El desafío con este tipo de datos está relacionado con la velocidad, el volumen, la variedad, la ciberseguridad, el significado, almacenamiento y filtrado de datos, y la necesidad de un sistema automatizado para procesarlos continuamente [82].

Igualmente, el AM necesita considerar las interacciones entre los componentes de un activo que se encuentran en distintas etapas de su ciclo de vida. AAM se basa en la consideración del ciclo de vida de los activos físicos y digitales. Los umbrales de mantenimiento y seguridad en una etapa temprana del ciclo de vida de los activos pueden ser diferentes de los de las etapas avanzadas de degradación con el tiempo y el kilometraje. Gestionar el mantenimiento en cada etapa del ciclo de vida de los activos, puede ayudar a maximizar el rendimiento de los activos. Esta perspectiva es esencial para considerar las distintas expectativas relacionadas con la operación, el mantenimiento y el negocio en las distintas etapas. Considerando todos estos factores, se puede evidenciar fácilmente la gran problemática que representa la implementación de servicios genéricos y específicos para subsistemas independientes. Esta descentralización de la información imposibilita la evaluación de las circunstancias particulares de cada activo [82].

La falta de normas y protocolos de interoperabilidad dentro de la organización resulta una grave problemática en la gestión del cambio dentro de esta. La actualización tecnológica de los sistemas, la infraestructura y los procesos de hardware y software heredados son eventos inevitables en la industria ferroviaria y su constante necesidad de adaptación a los cambios. Esto resulta un desafío desde los aspectos técnicos, legales, operativos y organizativos, y representa una disrupción en la cadena de conocimiento, pues la fuerza laboral debe ser capacitada para adoptar nuevas habilidades. Ya que las soluciones tecnológicas son adquiridas paulatinamente, estos retos deben ser afrontados en cada ocasión. La ausencia de un marco normativo para la adopción de estas nuevas tecnologías y la adaptación del SoS a los cambios supone una gran ineficiencia en la gestión de activos [82].

Para las organizaciones ferroviarias, los indicadores de desempeño son el lenguaje común que conecta el área técnica con la administrativa. Estos indicadores permiten comprender desde una perspectiva global el rendimiento de los activos y la operación a partir de objetivos financieros o relacionados al RAMS. En el caso donde estos KPIs son seleccionados inadecuadamente, u ofrecen información incompleta o irrelevante, este lenguaje común pasa de ser una herramienta para la cooperación, a una fuente de desinformación que afecta significativamente la toma de decisiones administrativas y, en consecuencia, una gestión de activos ineficiente.

La implementación de tecnologías de eficiencia energética y disminución del consumo no necesariamente tienen que estar relacionadas con la optimización, rediseño o reemplazo de componentes técnicos del material rodante o la infraestructura. La eficiencia energética y las tendencias de consumo se relacionan en igual proporción con el sector operativo y de mantenimiento. La adecuada planificación de rutas, horarios, períodos y estrategias de mantenimiento, consumo de energía, ciclo de vida, entre otros, son factores que pueden influir considerablemente en estas categorías. Entre estos elementos, probablemente la más importante es la política de mantenimiento. Esta se determina con base en el enfoque de la organización hacia el mantenimiento preventivo y/o correctivo que desea aplicar a sus activos. Es necesaria la optimización de las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo para reducir los costos de mantenimiento y aumentar la disponibilidad de los vehículos ferroviarios. Dicha optimización es compleja ya que depende de varios factores como la clasificación de las actividades de mantenimiento como preventivas o correctivas y el análisis del costo de mantenimiento asociado directo (recursos, inventario, horas-hombre) e indirecto (externalización, capacitación). La ausencia de tecnologías que faciliten este proceso se traduce a ineficiencias energéticas y consumos irresponsables [82].

Finalmente, debido al aumento del tráfico de pasajeros, la demanda de servicios ferroviarios ha aumentado constantemente en los últimos años. Realizar acciones de mantenimiento interrumpiendo la operación puede aumentar el costo de mantenimiento. Las exigentes necesidades operativas en combinación con la complejidad para predecir la necesidad de mantenimiento hacen que sea un desafío crear e implementar un cronograma que optimice tanto las ventanas de operación como de mantenimiento. Para aumentar la disponibilidad del sistema, las tareas de mantenimiento deben optimizarse en función de las limitaciones de costos, el estado de los vehículos ferroviarios, los componentes de alto valor, subcomponentes y la disponibilidad de repuestos y servicios, para evitar fallas imprevistas. Agregar restricciones operativas a los modelos de optimización del mantenimiento garantiza una operación y un mantenimiento alineados. Sin embargo, debido a la falta de inversión en la actualización de las TIC, el procesamiento de la información relevante para la toma de decisiones se ve obstaculizado, lo que conlleva a la ineficiente gestión de activos en la organización [82].

En respuesta a estas problemáticas, a nivel Latinoamericano, los operadores ferroviarios están adoptando tecnologías avanzadas para mejorar el monitoreo y mantenimiento de sus activos. Empresas como KSM [23] utilizan sensores en las vías y tecnologías de medición para detectar problemas en los trenes y la

infraestructura. SKF [24] ha implementado sensores de vibración en trenes para monitorear el estado de las vías y los componentes mecánicos, optimizando el mantenimiento. Otras soluciones como Hitachi Perpetuum Onboard [32], Strukton POSS Monitoring [33], y Voetalpine Roadmaster [34] ofrecen monitoreo constante y análisis de datos en tiempo real, contribuyendo a la eficiencia y seguridad de las redes ferroviarias al anticipar necesidades de mantenimiento y alertar sobre posibles problemas. Sin embargo, estas soluciones tecnológicas son implementadas de manera independiente para subsistemas particulares, mientras que la inversión e implementación de sistemas integradores continua escaso en la región.

Localmente, desde el año 2012, el Metro de Medellín hace uso de la tecnología Indra y su Sistema de Ayuda a la Explotación, el cual se integra con el sistema Da Vinci, también de Indra, que gestiona el tráfico de trenes de Metro desde 2008. Esta solución, basada en tecnologías de geolocalización, sistemas de información geográfica y comunicaciones móviles, proporciona al centro de control datos en tiempo real sobre el material rodante que permite optimizar la administración, controlar y planificar la explotación, y acelerar la toma de decisiones en caso de imprevistos [20]. Sin embargo, así como las demás soluciones tecnológicas implementadas en el Metro de Medellín y en otros sistemas ferroviarios de América Latina, esta está enfocada en un subsistema particular, y carece completamente de la interoperabilidad y correspondencia necesaria para la óptima gestión de activos.

Recientemente, la problemática ha sido reconocida y ha ganado esfuerzos a nivel mundial para ser solucionada. En el caso del Metro de Medellín, en la evaluación del Sistema de Control Interno para el periodo Julio-diciembre del año 2022 se tiene como oportunidad de mejora en cuanto a actividades de monitoreo: “Realizar un mejor aprovechamiento de los diferentes sistemas de información de la Empresa para la realización de la evaluación independiente enfocado en la transformación digital de la Empresa que se viene trabajando para el quinquenio 2021 – 2025”. Adicionalmente, en su plan de acción se cuenta con objetivos como medir la rentabilidad de sus activos [21]. Estos son pequeños acercamientos a la planificación y gestión de inversiones, así como la gestión del desempeño de activos. Sentando así las bases para la integración de las soluciones tecnológicas en pro de una gestión de activos óptima.

Igualmente, a nivel nacional, la situación actual resulta prometedora en lo referente a la inversión en proyectos de transporte público. El artículo 2 del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 [3] establece que la nación invertirá entre el 40% y el 70% en proyectos de transporte público de pasajeros, incluyendo infraestructura, vehículos e iniciativas de sostenibilidad. Por otra parte, el artículo 183 indica que se proporcionará apoyo financiero de hasta el 50% para proyectos de transporte público en funcionamiento que hayan sido cofinanciados previamente por el Gobierno. Este apoyo a los proyectos de transporte público se replica en otros países de Latinoamérica y del mundo, dando cabida a una gran oportunidad para la implementación de plataformas integradoras de servicios digitales y la centralización de fuentes de información dentro de los sistemas ferroviarios globales.

5.4.MAGNITUD ACTUAL DEL PROBLEMA: INDICADORES DE REFERENCIA

El problema planteado, aunque es de gran relevancia en la industria ferroviaria, tiene un grado elevado de especificidad, lo que, en consecuencia, implica un escaso banco de información del cual obtener estadísticas representativas para dimensionar la situación. El problema “Ineficiencia en la gestión de activos ferroviarios debido a la descentralización de los subsistemas y su consecuente incompatibilidad informática” cubre un amplio espectro de causas y consecuencias. Factores que están ligados unos con otros, pero que, debido a la complejidad de su medición, no son estudiados con el detalle con el que son descritos en el árbol de problemas. Por este motivo, para la valoración de la magnitud actual del problema, se examinará la situación

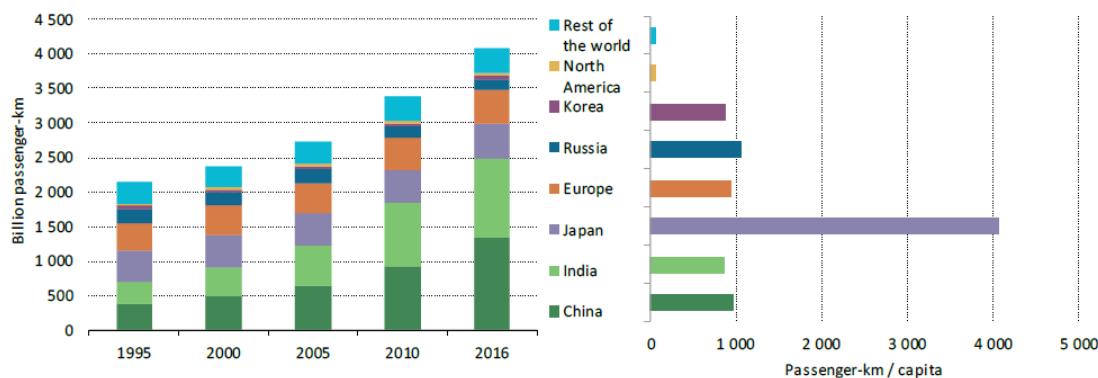
global de la gestión de activos ferroviarios, empezando por los principales impulsores en el crecimiento del mercado de gestión de activos ferroviarios y el mercado ferroviario digital, y cuál es el panorama de ambos a futuro. A partir de esto, se identifican las tendencias globales de soluciones tecnológicas en la industria ferroviaria y las inversiones principales realizadas. Dentro de estas tendencias, se ahonda en la tecnología IoT, su adopción y los gastos a nivel mundial. Finalmente, se entra en detalle en lo relacionado al foco principal de los sistemas metro, el servicio. Esta categoría se subdivide en otras áreas que están directamente relacionadas con la gestión de activos como lo son la seguridad, ambiental y mantenimiento, que juegan un papel fundamental en la prestación de un servicio de calidad a los usuarios.

Para dimensionar la importancia de la gestión de activos en la industria ferroviaria, y en este caso particular, en los sistemas de transporte público urbano Metro, es fundamental determinar el factor principal para el crecimiento en el mercado de gestión de activos ferroviarios y el mercado ferroviario digital. Aunque la complejidad de los sistemas ferroviarios puede dar cabida a un vasto rango de elementos relacionados con la necesidad de gestionar los activos, el primordial factor en los sistemas de transporte masivo siempre será la demanda del servicio por parte de los pasajeros.

Con base en el reporte “The Future of Rail: Opportunities for energy and environment” de la International Energy Agency (2019) [28], como se muestra en la figura 1, la actividad de pasajeros ferroviarios ha aumentado un **91%** en las últimas dos décadas, principalmente en China e India. Y siendo Japón, con diferencia, el país con mayor actividad ferroviaria per cápita.

Figura 1. Actividad ferroviaria de pasajeros, 1995-2016 (izquierda) y pasajeros-kilómetros per cápita, 2016 (derecha).

Figure 1.9 Passenger rail activity, 1995-2016 (left) and passenger-kilometres per capita, 2016 (right)



Sources: IEA assessment based on UIC (2018a); UITP (2018a); ITDP (2018), National Bureau of Statistics of China (2018); Indian Railways (2018a); Japan Ministry of Land, Infrastructure and Tourism (2018); AAR (2017) and Russian Federation State Statistics Service (2018).

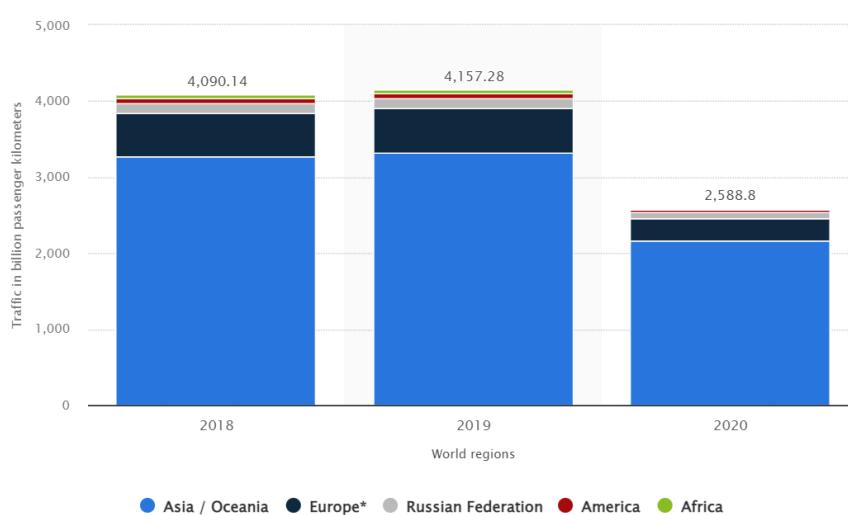
Fuente: Adaptado de “Figure 1.9 - Passenger rail activity, 1995-2016 (left) and passenger-kilometres per capita, 2016 (right) [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

La actividad del transporte ferroviario de pasajeros comprende movimientos de pasajeros urbanos y no urbanos y normalmente se mide en pasajeros-kilómetros por año, una unidad de medida que representa el transporte de un pasajero por un modo de transporte definido (carretera, ferrocarril, aire, mar, etc.) a lo largo de un kilómetro. Esta actividad ha aumentado significativamente en los últimos veinte años, pero se concentra en unas pocas regiones (Figura 1): China, India, Japón, la Unión Europea y Rusia, las cuales

representan en conjunto más del **90%** de la actividad ferroviaria de pasajeros en todo el mundo. Tan solo en 2016, el transporte ferroviario recorrió más de 4,1 trillones de pasajeros-kilómetros.

Esta cifra permaneció relativamente constante hasta el periodo de pandemia en el 2020 como se observa en el estudio realizado por el departamento de investigación de Statista (2023) [29] en la figura 2.

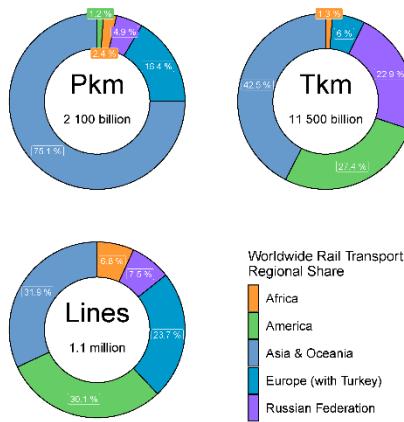
Figura 2. Tráfico mundial de pasajeros por ferrocarril de 2018 a 2020, por región (en billones de pasajeros-kilómetros)



Fuente: Adaptado de “Global rail passenger traffic from 2018 to 2020, by region (in billion passenger kilometers)” [Gráfico], de Statista Research Department, (2023). Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/263546/global-rail-passenger-activity-by-region/>

En 2021, esta cifra se redujo aún más como lo muestra el estudio realizado por la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC por sus siglas en inglés) en el 2021 [50].

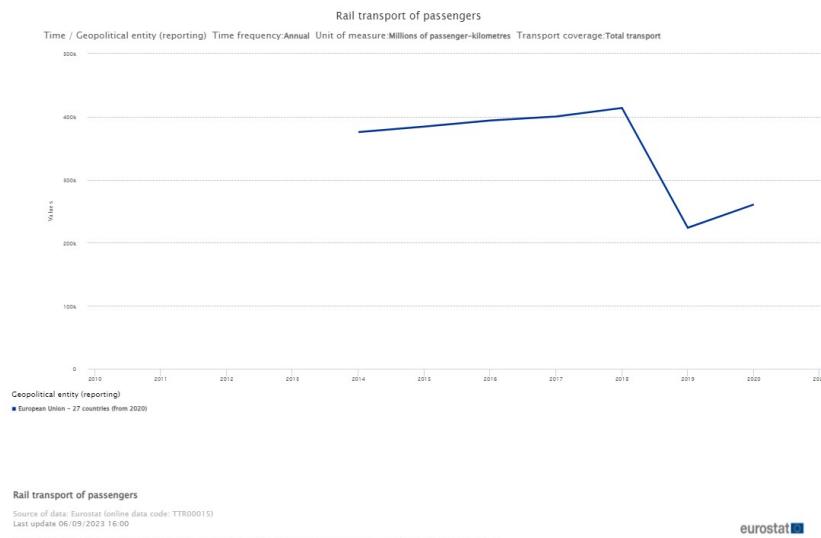
Figura 3. Participación regional del transporte ferroviario mundial - 2021



Fuente: Adaptado de “Worldwide Rail Transport Regional Share - 2021” [Gráfico], de UIC, (2021). Disponible en: <https://uic.org/support-activities/statistics/>

Sin embargo, aunque la demanda de servicios ferroviarios se vio considerablemente reducida por la pandemia, la tendencia en los años previos fue creciente, como lo denota la gráfica de transporte ferroviario de pasajeros compartida por la base de datos Eurostat para la Unión Europea [89].

Figura 4. Transporte ferroviario de pasajeros en la UE para 2014-2020

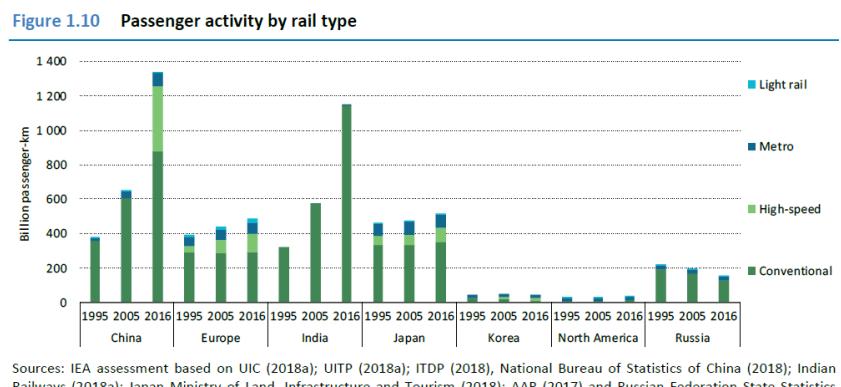


Fuente: Adaptado de “Rail transport of passengers” [Gráfico], de Eurostat, (2023). Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ttr00015/default/line?lang=en>

Aunque la figura 4 solo corresponda a la Unión Europea, resulta evidente que esta tendencia aplicaba a nivel global. Actualmente, aunque no existan estadísticas que señalen la demanda de servicios ferroviarios para los años 2022 y 2023, es casi seguro que la tendencia mundial volvió a estabilizarse por encima de los 4 trillones de pasajeros-kilómetros y continua con su ascenso paulatino.

Ya reestablecida la tendencia mundial creciente en la demanda, es necesario particularizar estas demandas para cada uno de los tipos de servicios ferroviarios para pasajeros. El reporte de la Agencia Internacional de Energía indica que la mayor parte de la actividad ferroviaria de pasajeros se realiza en trenes convencionales, aunque el crecimiento de la actividad es más significativo en el metro y el tren de alta velocidad como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Actividad de pasajeros por tipo de ferrocarril.



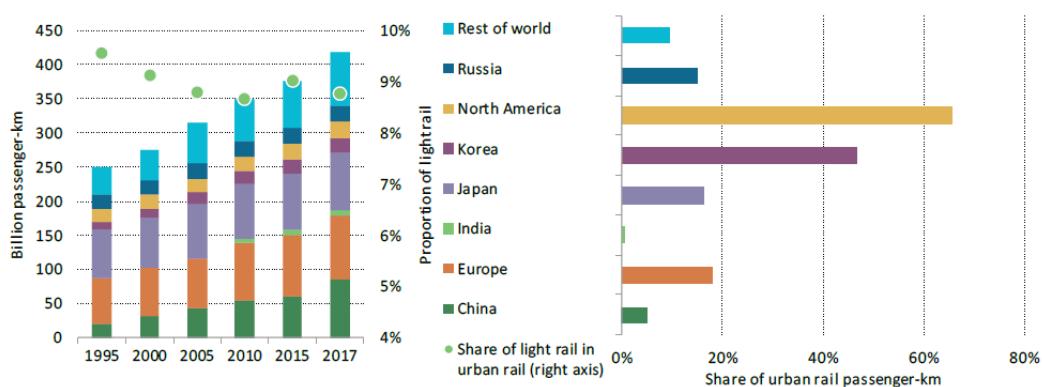
Fuente: Adaptado de “Figure 1.10 - Passenger activity by rail type” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

El ferrocarril urbano, incluidos los servicios de metro y tren ligero, satisfizo la demanda de aproximadamente 500 millones de pasajeros-kilómetro en 2017, lo que representa el 2% de la actividad mundial de transporte urbano de pasajeros y el 9% de la actividad total de pasajeros por ferrocarril. La actividad en las redes ferroviarias urbanas ha aumentado continuamente durante el último siglo (desde la apertura del primer sistema de metro en 1863 en Londres). Se ha acelerado rápidamente en los últimos años, principalmente debido al importante desarrollo de nuevos sistemas de metro en Asia.

El ferrocarril urbano representa alrededor del 5% de la demanda total de trenes de pasajeros en China y alrededor del 15% en la Unión Europea, Japón y Rusia (Figura 6, derecha). En Corea, casi la mitad y en América del Norte más del 60% de la demanda total de trenes de pasajeros es atendida por ferrocarril urbano. La elevada proporción en América del Norte se atribuye al pequeño volumen de transporte ferroviario de pasajeros no urbano. En Corea, refleja el tamaño relativamente pequeño del país y la importante extensión de las redes de metro en las principales áreas urbanas. En la India, el ferrocarril convencional es más dominante, y el ferrocarril urbano representa sólo el 1% del transporte ferroviario de pasajeros. En el caso de China, esta alberga varios de los sistemas de metro más transitados del mundo (Tabla 3) y representa más de una cuarta parte de la actividad ferroviaria urbana mundial (Figura 6, izquierda).

Figura 6. Actividad ferroviaria urbana, 1995-2017 (izquierda) y participación del ferrocarril urbano en el total de trenes de pasajeros, 2017 (derecha).

Figure 1.11 Urban rail activity, 1995-2017 (left) and shares of urban rail in total passenger rail, 2017 (right)



Notes: Urban rail consists of metro rail and light rail in the classification used in this report. The urban rail activity for 2017 is based on reported data in the case of metros and an estimate in the case of light rail, based on UTIP (2018d) and ITDP (2018).

Sources: IEA assessment based on UTIP (2015a), UTIP (2018d) and ITDP (2018).

Fuente: Adaptado de “Figure 1.11 – Urban rail activity, 1995-2017 (left) and shares of urban rail in total passenger rail, 2017 (right)” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

Tabla 3. Sistemas de metro más utilizados.

Table 1.1 Most used metro and light rail systems

City	Metro (2017)
	Number of trips per year (millions)
Tokyo	3 420
Moscow	2 369
Shanghai	2 045
Beijing	1 988
Seoul	1 878
Guangzhou	1 821
New York City	1 806
New Delhi	1 789
Mexico City	1 679
Hong Kong, China	1 600

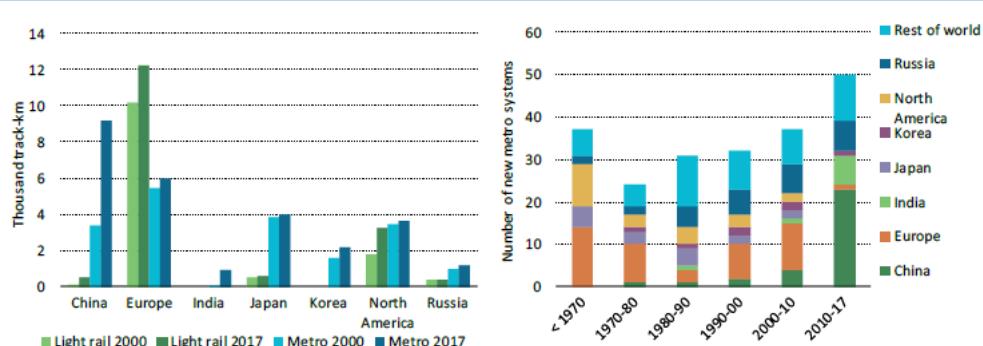
Sources: UITP (2018d) for metro and UITP (2015b) for light rail.

Fuente: Adaptado de “Table 1.1 – Most used metro and light rail systems” [Tabla], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

Esta creciente demanda en los servicios ferroviarios urbanos viene de la mano de un progresivo aumento en la extensión de las redes ferroviarias urbanas y la apertura de nuevos sistemas de metro. En 2017, en todo el mundo, 194 ciudades tenían sistemas de metro y operaban más de 32 000 kilómetros de vías (UITP, 2018c; ITDP, 2018). Además, 221 ciudades tenían sistemas de tren ligero, con 21.000 kilómetros de vías. Desde 2010, se han abierto nuevos sistemas de metro en 43 ciudades, 32 de las cuales están en Asia (Figura 7). La longitud de la red general de metros ha aumentado en 4.800 kilómetros desde 2000, cuando la longitud total era de 11.300 kilómetros. En los próximos cinco años, se espera que se abran nuevas líneas y ampliaciones en muchos países, incluidas las primeras líneas que se construirán en África subsahariana (en Abidján, Abuja y Lagos) (UITP, 2018a).

Figura 7. Extensión de las redes ferroviarias urbanas (metro y tren ligero), 2000-2017 (izquierda) y apertura de nuevos sistemas de metro, 1970-2017 (derecha).

Figure 1.3 Extension of urban rail networks (metro and light rail), 2000-2017 (left) and opening of new metro systems, 1970-2017 (right)



Note: The light rail line figures for 2017 are estimates based on UITP (2018d) and ITDP (2018).

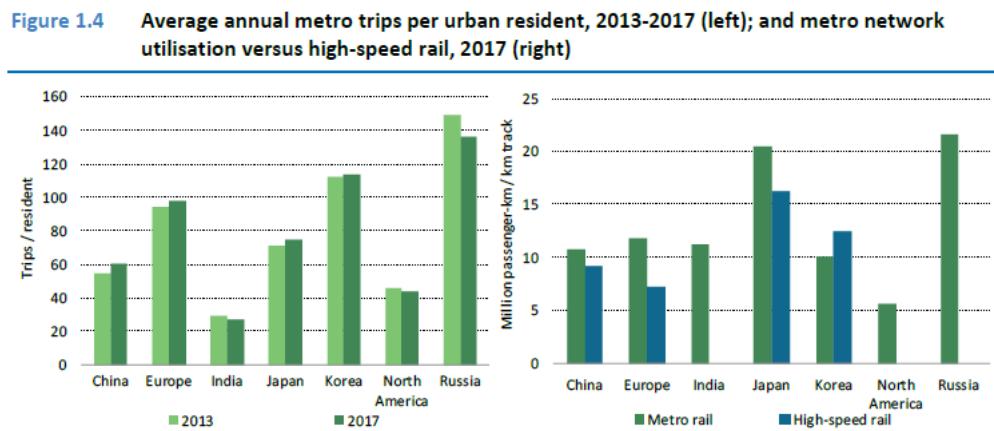
Sources: IEA analysis based on UITP (2015a), UITP (2018d) and ITDP (2018).

Fuente: Adaptado de “Figure 1.3 – Extension of urban rail networks (metro and light rail), 2000-2017 (left) and opening of new metro systems, 1970-2017 (right)” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en:

<https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

De igual forma, el desarrollo progresivo de los sistemas de metro se ve reflejado en la intensidad del uso de estos. Indicadores como el número promedio de viajes en metro por residente urbano en un año (Figura 8, izquierda) y el número de pasajeros-kilómetro por kilómetro de longitud de la red (Figura 8, derecha) representan la relevancia actual y potencial para un mayor crecimiento de estos sistemas. Los sistemas de metro tienen, con diferencia, la tasa de utilización más alta de todos los sistemas ferroviarios (ya sea medida en tren-kilómetro o pasajero-kilómetro) por kilómetro de longitud de vía. En promedio, un sistema de metro recibe 13 millones de pasajeros-kilómetro por año por kilómetro de vía.

Figura 8. Promedio anual de viajes en metro por residente urbano, 2013-2017 (izquierda); y utilización de la red de metro versus tren de alta velocidad, 2017 (derecha).



Notes: For the figure on the left, results are based on a weighted average of the number of annual trips per city resident (weighted relative to the number of residents per city) taking into account only cities that have a metro system.

Sources: For the figure on the left, data are from the UITP (2018d). The figure on the right represents IEA estimates based on UIC (2018a); UITP (2018a); National Bureau of Statistics of China (2018); Eurostat (2018); Indian Railways (2018a); Japan Ministry of Land, Infrastructure and Tourism (2018); AAR (2017); and Russian Federation State Statistics Service (2018).

Fuente: Adaptado de “Figure 1.4 – Average annual metro trips per urban resident, 2013-2017 (left); and metro network utilisation versus high-speed rail, 2017 (right)” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en:

<https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

Con base en la información anterior y las tendencias identificadas, se realizan importantes predicciones para la actividad ferroviaria urbana en las próximas décadas. Para 2050, se espera que el número de personas que viven en ciudades aumente en 2.500 millones de personas, alcanzando dos tercios de la población mundial. En consecuencia, se prevé que la demanda total de transporte urbano aumentará un 1,7% anual en promedio hasta 2050. La mayor parte de la urbanización se producirá en países en desarrollo y emergentes, y será en estas regiones donde el número y tamaño de las megaciudades densamente pobladas aumente donde se espera se desarrollen la mayor cantidad de sistemas ferroviarios urbanos.

En el Escenario Base, se proyecta que la actividad ferroviaria urbana mundial crecerá de 420 mil millones de pasajeros-kilómetro en 2017 (1% de toda la actividad de transporte urbano) a un billón en 2050 (2% de la actividad de transporte urbano), un aumento de más de 2% anual en promedio (Figura 9). El aumento de la demanda en los próximos años se puede asociar con una de las causas indirectas del problema central:

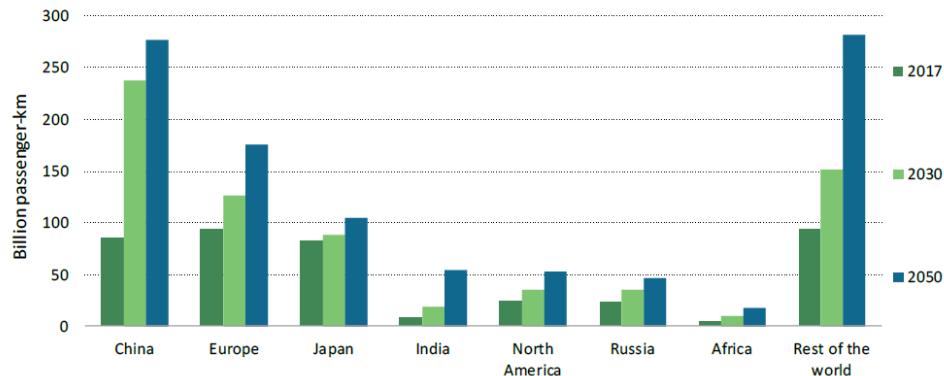
6.1. Mayor flujo de usuarios.

De esto, derivan las demás causas asociadas del problema central, como los eventos a gran escala en la ciudad, y la planificación y coordinación inadecuadas para responder a esta demanda variable.

Debido a esta tendencia ascendente, la IEA plantea que, en el Escenario Base, se abrirán 200 nuevas líneas de metro en los próximos cinco años, incluida la primera en África subsahariana. Estas añadirán casi 7 000 kilómetros de nuevas líneas de metro a la red mundial (UITP, 2018a). También están previstos alrededor de 900 kilómetros de nuevas líneas de tren ligero en los próximos cuatro años, principalmente en Europa, pero también en Asia y América (UITP, 2018b).

Figura 9. Actividad ferroviaria urbana por región en el Escenario Base, 2017, 2030 y 2050.

Figure 2.6 Urban rail activity by region in the Base Scenario, 2017, 2030 and 2050



Source: IEA (2018b).

Key message • Urban transport activity growth is highest in China and mainly takes place before 2030. In the next five years, China is expected to double its current metro network length.

Fuente: Adaptado de “Figure 2.6 – Urban rail activity by region in the Base Scenario, 2017, 2030 and 2050” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

Adicional a esto, el avance de los sistemas de gestión del tráfico puede ampliar la tasa de utilización potencial de las redes ferroviarias urbanas aún más de lo proyectado. Como lo señala el reporte de la AIE [28], los rápidos avances en datos, análisis y conectividad están impulsando una ola de digitalización, incluso en el sector del transporte (AIE, 2017). A medida que la demanda de movilidad ferroviaria aumenta más rápido que la construcción de nueva infraestructura, las tecnologías digitales pueden facilitar un uso más intensivo de las vías al reducir el tiempo y la distancia entre los trenes, aumentar la capacidad e impulsar el retorno de la inversión, al tiempo que mejoran la comodidad del usuario y mantienen altos estándares de seguridad.

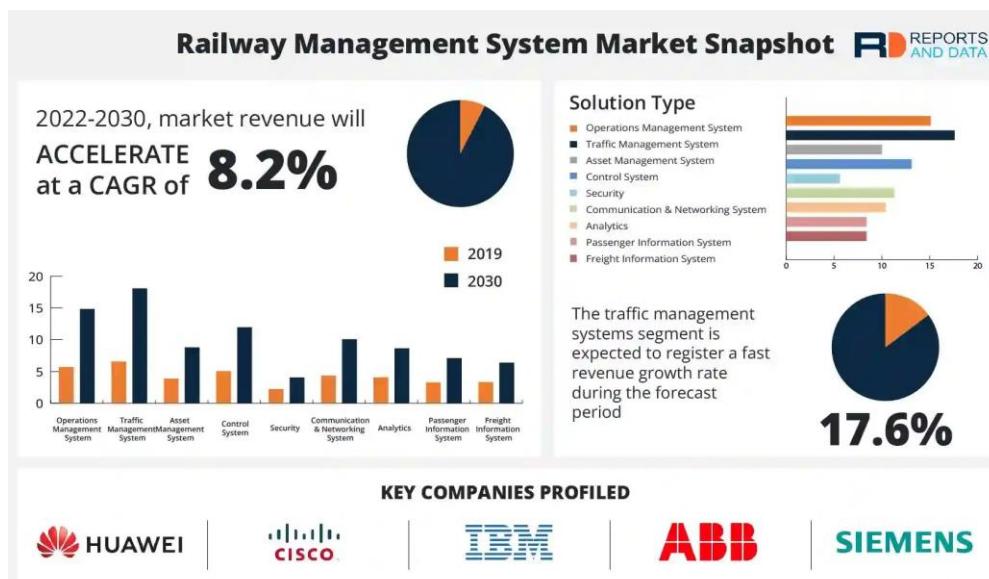
Dentro de estas tecnologías, están los sistemas avanzados de gestión y control del tráfico, los cuales permiten garantizar el funcionamiento seguro y eficiente del transporte ferroviario. Estos sistemas incluyen controles de trenes basados en comunicaciones (CBTC), ampliamente utilizados para el ferrocarril urbano, donde se combinan con sistemas de asistencia al conductor (DAS) para maximizar el uso de la red. También incluyen el Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario (ERTMS), que utiliza sistemas de control, comando, señalización y comunicación para garantizar la interoperabilidad de los trenes en toda la región, principalmente en las redes ferroviarias convencionales y de alta velocidad. Todas estas tecnologías tienen la capacidad de maximizar la utilización de la red al reducir el paso entre trenes, y también han demostrado efectividad para reducir el consumo de energía hasta en un 15% (Dunbar, Roberts y Zhao, 2017).

Si a esto se le adiciona el uso de otras tecnologías digitales, como el análisis de big data y la inteligencia artificial, los servicios para los usuarios finales mejorarían significativamente gracias a la integración de la información. Asimismo, mejoraría la eficiencia energética, lo que, en consecuencia, reduciría los costes para

los operadores en gran proporción. Sin embargo, para sacar el mayor provecho de estas soluciones tecnológicas, una adecuada gestión de activos es fundamental. Sin mejoras en esta área, un gran potencial se verá desperdiciado, y los operadores ferroviarios a nivel mundial son conscientes de ello.

Este creciente interés en la gestión de activos ferroviarios se ve reflejado en el mercado y sus correspondientes estimaciones a futuro. En el reporte sobre el mercado de sistemas de gestión ferroviaria de la empresa Reports and Data (2022) [90] destacan que el tamaño del mercado mundial de sistemas de gestión ferroviaria fue de 44,57 mil millones de dólares en 2021 y se espera que registre una tasa compuesta anual de ingresos del 8,2% entre 2022 y 2030 como se observa en la figura 10. La creciente necesidad de mejorar el rendimiento del servicio ferroviario, la gestión de las operaciones, y el monitoreo del material rodante, el aumento de los viajes y el turismo, y la expansión de la conectividad ferroviaria en todas las regiones, son factores clave que impulsan el crecimiento de los ingresos del mercado mundial de sistemas de gestión ferroviaria.

Figura 10. Panorama del mercado de sistemas de gestión ferroviaria.



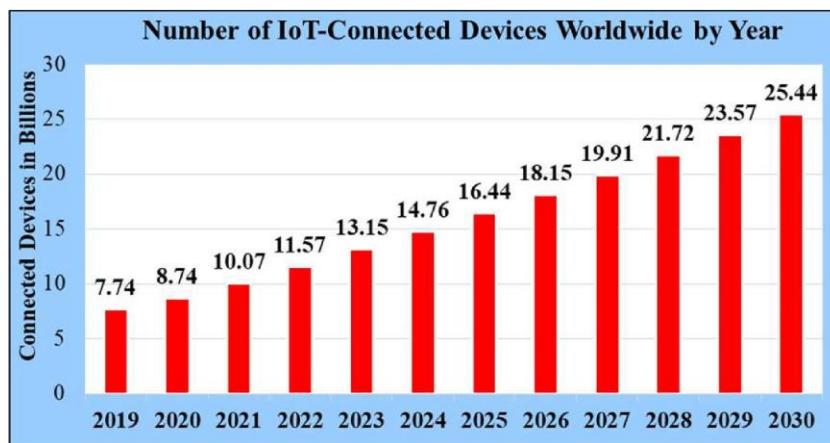
Fuente: Adaptado de “Railway Management System Market Snapshot” [Gráfico], de Reports and Data, (2022). Disponible en: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/railway-management-system-market>

Como lo menciona el reporte del mercado de sistemas de gestión ferroviaria de la empresa Global Market Insights (2023) [91], la progresiva adopción e integración de la tecnología AI y los servicios basados en la nube están mejorando el mantenimiento predictivo, optimizando las operaciones ferroviarias y reduciendo el tiempo de inactividad. Las soluciones basadas en la nube facilitan el acceso a datos en tiempo real, lo que permite una toma de decisiones eficiente en toda la red ferroviaria. Esta sinergia permite a los operadores ferroviarios mejorar la seguridad, mejorar la eficiencia y brindar experiencias superiores a los pasajeros. A medida que la industria reconoce el potencial transformador de las tecnologías AI y en la nube, se espera que su implementación impulse innovaciones, agilice las operaciones y eleve la eficiencia y competitividad general del mercado.

El sector del transporte ferroviario está siendo testigo de la creciente tendencia del IoT y la digitalización, donde los dispositivos interconectados y las tecnologías basadas en datos están transformando las operaciones. Singh, Elmi, Krishna Meriga, Pasha, y A. Dulebenets (2022) [92], evidencian tanto el número

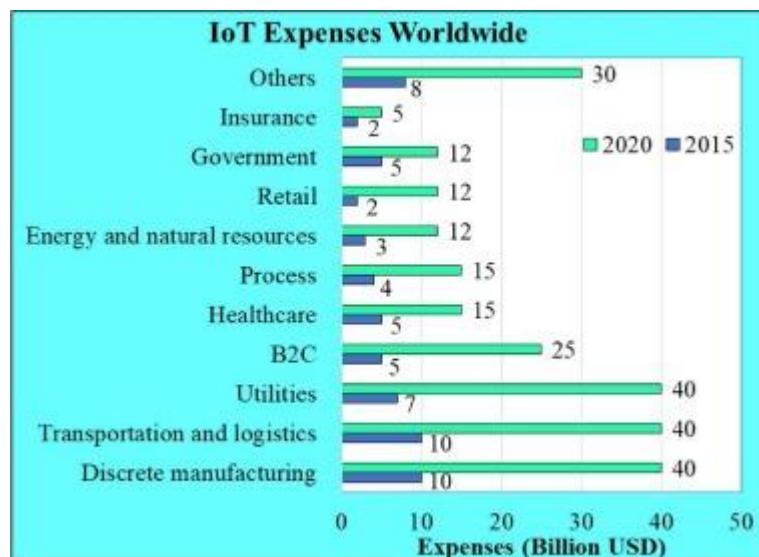
de dispositivos IoT conectados entre 2019 y 2030 como el gasto mundial en IoT (billones de dólares) para 2015 y 2020 en las figuras 11 y 12 respectivamente. Los sensores IoT en trenes y vías proporcionan datos en tiempo real sobre el rendimiento, las necesidades de mantenimiento y el comportamiento de los pasajeros. La digitalización mejora la programación, la gestión de activos y los servicios a los pasajeros. Esta tendencia optimiza la eficiencia, la seguridad y la experiencia de los pasajeros al permitir el mantenimiento predictivo, la asignación eficiente de recursos y el intercambio de información en tiempo real. A medida que el transporte ferroviario se vuelve más interconectado y se centra en los datos, el IoT y la digitalización remodelarán las capacidades y la competitividad de la industria.

Figura 11. Número de dispositivos conectados a IoT entre 2019 y 2030.



Fuente: Adaptado de “Fig. 2. Number of IoT-connected devices between 2019 and 2030” [Gráfico], de Singh, et al. (2022). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772390922000385>

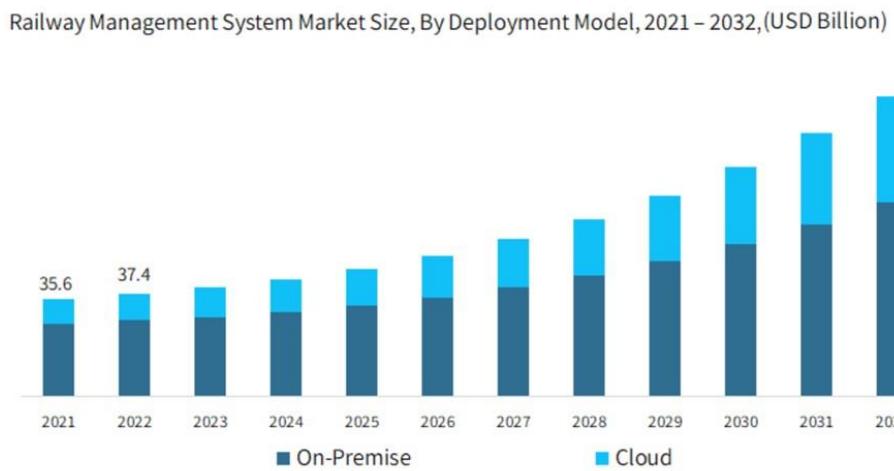
Figura 12. Gasto mundial en IoT (billones de dólares) para 2015 y 2020.



Fuente: Adaptado de “Fig. 3. Worldwide spending on the IoT by verticals (billion USD) for 2015 and 2020.” [Gráfico], de Singh, et al. (2022). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772390922000385>

Reports and Data indica que, en la industria de los sistemas de gestión ferroviarios, las soluciones tecnológicas pueden ser implementadas de manera local o en la nube. Se espera que el segmento de la nube, donde son implementadas las soluciones de IoT, registre una tasa de crecimiento de ingresos constante entre 2021 y 2032 como lo muestra la figura 13. Esto, debido al creciente uso de soluciones basadas en la nube en el sector ferroviario para gestionar activos, tráfico e infraestructura, y mejorar la satisfacción de los pasajeros al proporcionar información sobre trenes en tiempo real. Los operadores ferroviarios prefieren la implementación en la nube a la local, ya que ofrece ventajas como flexibilidad, protección IT, alta velocidad y asistencia las 24 horas. Además, estos modelos permiten a los administradores ferroviarios automatizar procesos críticos, obtener visibilidad comercial y mantener el cumplimiento de las normas de seguridad para proporcionar una infraestructura estable, lo que se espera que impulse el crecimiento de los ingresos del segmento.

Figura 13. Tamaño del mercado del sistema ferroviario, por modelo de implementación, 2021-2032
(Billones de dólares).



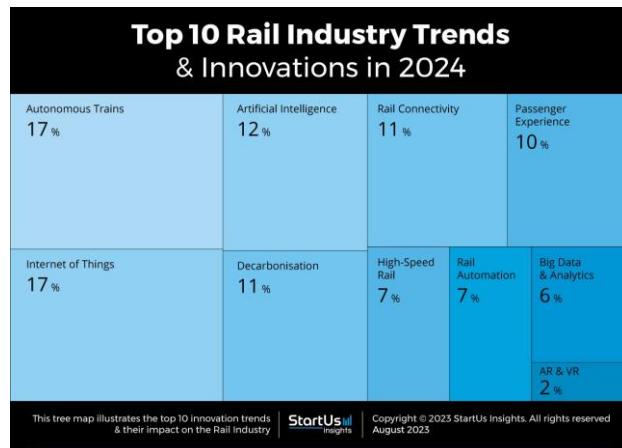
Source: www.gminsights.com

Fuente: Adaptado de “Railway system market size, by deployment model, 2021-2032, (USD Billion)” [Gráfico], de Global Market Insights, (2023). Disponible en: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/railway-management-system-market>

Dentro de este mercado, el panorama competitivo está bastante fragmentado y hay muchos actores clave que operan a nivel global y regional. Los actores clave participan en el desarrollo de productos y alianzas estratégicas para expandir sus respectivas carteras de soluciones y servicios y ganar una base sólida en el mercado global. Las principales empresas del mercado incluyen ABB Limited, IBM Corporation, Cisco Systems, Inc., Huawei Technologies Co., Ltd., Siemens AG, Alstom SA, Honeywell International, Inc., Accenture PLC, Hitachi Ltd., DXC Technology Services LLC, Bombardier Inc. y Wabtec Corporation.

Estas empresas ofrecen productos que abarcan las diferentes tendencias de la industria ferroviaria mencionadas por la empresa StartUs Insights (2023) [93] en la figura 14.

Figura 14. Tendencias e innovaciones de la industria ferroviaria en 2024.



Fuente: Adaptado de “Top 10 rail industry trends and innovations in 2024” [Gráfico], de StartUs Insights, (2023). Disponible en: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/top-10-rail-industry-trends-innovations-2021-beyond/>

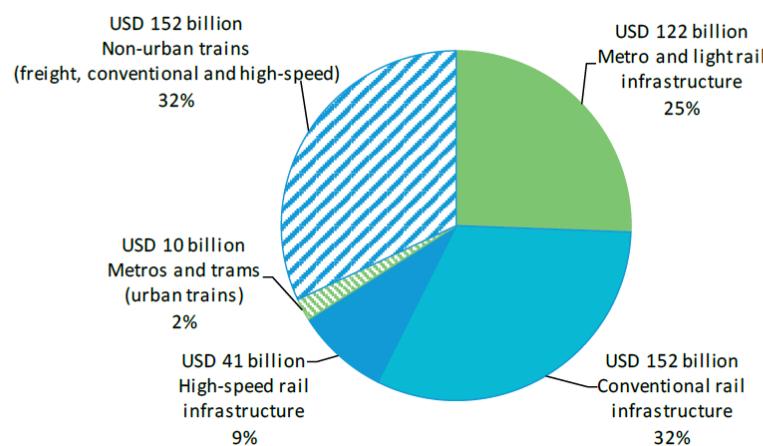
Es precisamente la implementación de diferentes productos provenientes de la gran oferta de soluciones tecnológicas y proveedores de estas lo que acrecienta el problema central y sus causas principales:

1. Implementación de servicios genéricos y específicos para subsistemas independientes.
2. Plataformas de tecnología de información que no se integran fácilmente.
3. Falta de normas y protocolos de interoperabilidad dentro de la organización.

La creciente demanda de sistemas ferroviarios y el incesante avance tecnológico obliga a los operadores ferroviarios a realizar grandes inversiones en la infraestructura, material rodante y tecnologías IoT (Figura 12). En el caso de las inversiones en infraestructura y material rodante, el reporte de la IEA [28] establece que es necesario gastar aproximadamente 475 mil millones de dólares anualmente en la construcción, operación y mantenimiento del sistema ferroviario. Casi dos tercios de esta cantidad se necesitan para construir y mantener líneas ferroviarias y el resto para renovar y ampliar el material rodante. La figura 15 evidencia los costos de inversión promedio anual en el Escenario Base de 2018 a 2050.

Figura 15. Costos de inversión promedio anual en el Escenario Base, 2018 a 2050

Figure 2.19 Annual average investment costs in the Base Scenario, 2018 to 2050



Source: IEA (2018b).

Fuente: Adaptado de “Figure 2.19 - Annual average investment costs in the Base Scenario, 2018 to 2050” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

Frente a estos pronósticos, Latinoamérica, una de las regiones que se proyecta tendrán mayor crecimiento en su industria ferroviaria, han asumido los últimos años una estrategia de inversión más agresiva en la infraestructura y material rodante de sistemas metro como lo exhiben las figuras 16 y 17 parte del reportaje de María Paula Aristizábal para La República (2019) [27].

Figura 16. Inversión de países latinoamericanos en tecnologías Metro

BRASIL Y COLOMBIA, LOS QUE MÁS INVERTIRÁN EN METROS

Proyectos a largo plazo



Fuente: Alcaldía de Bogotá, Sondeo LR

Gráfico: LR, VT

Fuente: Adaptado de “BRASIL Y COLOMBIA, LOS QUE MÁS INVERTIRÁN EN METROS” [Gráfico], de Aristizábal, M. P, (2019). Disponible en: <https://www.larepublica.co/globoeconomia/conozca-cuales-son-las-inversiones-que-tendran-los-metros-que-planea-america-latina-2922944>

Figura 17. Inversión y panorama en Latinoamérica.

PANORAMA DE LOS METROS EN AMÉRICA LATINA

Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • US\$8.421 millones a 2012 • Metro de Fortaleza de Brasil • US\$388 millones • El Gobierno proyecta invertir US\$6.015 millones
Colombia (Bogotá)	<ul style="list-style-type: none"> • US\$4.400 millones 24 km
Ecuador (Quito)	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión inicial US\$2.009 millones • Entre US\$360 y US\$400 costará la extensión de 5,4 kilómetros
Panamá (Ciudad de Panamá)	<ul style="list-style-type: none"> • Línea 2 US\$401.000 millones • Línea 3 US\$167.800 millones
Lima	<ul style="list-style-type: none"> • Línea 1 • US\$469.16 millones cuesta la ampliación • Desde 2011 hasta febrero de 2019 han invertido US\$588.8 millones
Santiago de Chile	<ul style="list-style-type: none"> • Línea 2 • US\$409,2 millones 5,2 km
Buenos Aires	<ul style="list-style-type: none"> • Banco Europeo de Inversiones prestó US\$104 millones para reacondicionar la línea D • Planean invertir US\$264,75 millones

Fuente: Adaptado de “PANORAMA DE LOS METROS EN AMÉRICA LATINA” [Gráfico], de Aristizábal, M. P, (2019). Disponible en: <https://www.larepublica.co/globoeconomia/conozca-cuales-son-las-inversiones-que-tendran-los-metros-que-planea-america-latina-2922944>

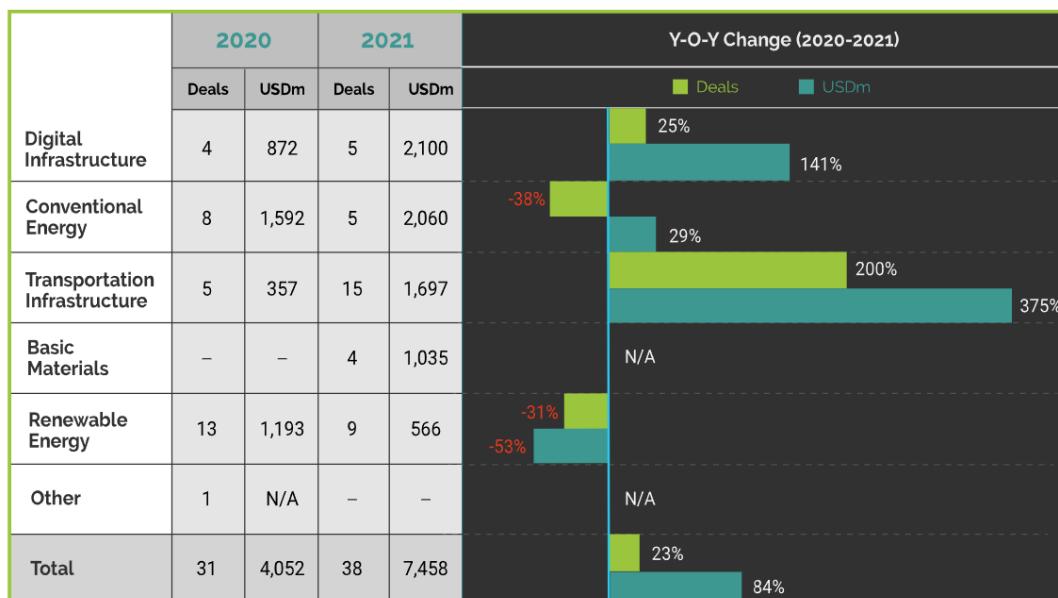
No obstante, es fundamental, a la par de estas inversiones en infraestructura y material rodante, destinar fondos significativos a la infraestructura tecnológica, y en especial, los sistemas de gestión de activos para obtener el mayor beneficio de las soluciones tecnológicas implementadas. Esto se relaciona directamente con la causa directa del árbol de problemas:

8. Falta de inversión adecuada en la actualización y estandarización de las TIC.

Como lo señala la figura 18 del estudio realizado por la empresa LAVCA (2021) [94], la inversión en infraestructura digital aumentó considerablemente entre 2020 y 2021. Sin embargo, para aumentar la competitividad de los sistemas metro en América Latina, se debe incrementar aún más la inversión tanto en soluciones tecnológicas como en sistemas de gestión de activos que integren estas soluciones. Todo esto, a la par que aumenta el flujo de capital hacia proyectos de infraestructura ferroviaria y material rodante.

Figura 18. Inversión de capital privado en infraestructura latinoamericana por sector, 2020-2021.

Private Capital Investment in Latin American Infrastructure by Sector, 2020 - 2021



Fuente: Adaptado de “Private capital investment in Latin American infrastructure by sector, 2020-2021” [Gráfico], de LAVCA, (2022). Disponible en: <https://lavca.org/industry-data/2022-lavca-industry-data-and-analysis/>

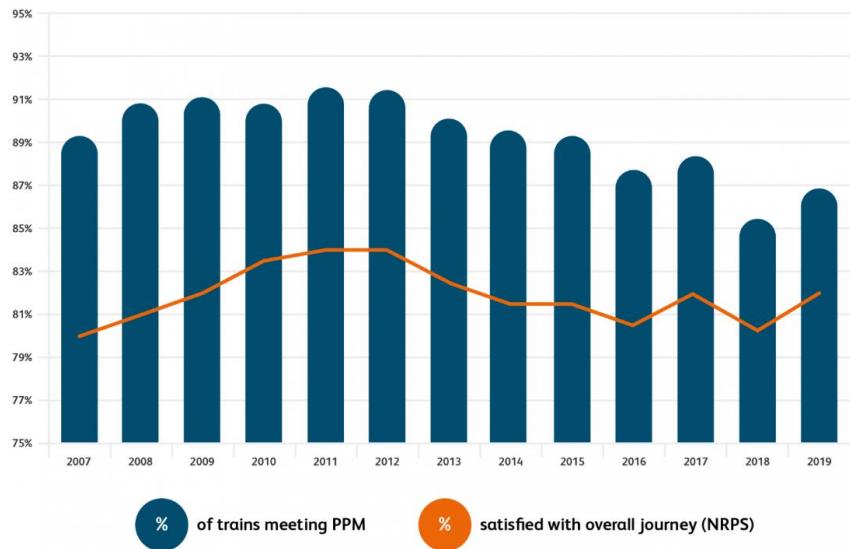
Estas inversiones son elementales en la industria ferroviaria, en especial, en los servicios de transporte urbano de pasajeros, pues posibilitan la mejora constante del servicio. Tanto los metros como los trenes ligeros tienen como foco principal ofrecer el mejor servicio a sus pasajeros, por ello, constantemente están evaluando su rendimiento en métricas como la medida de desempeño público (PPM por sus siglas en inglés), pues esta combina cifras de puntualidad y confiabilidad en una única medida de desempeño. En el caso de la empresa Network Rail, principal propietaria y administradora de la infraestructura ferroviaria en Gran Bretaña, estos miden su rendimiento con base en esta métrica.

Cada mes, Network Rail reporta su medida de desempeño público y responsabilidad por demoras. Para la medición del PPM, estos establecen que el PPM es el porcentaje de trenes que llegan a su estación de destino “a tiempo” en comparación con el número total de trenes previstos. Un tren se define puntual si llega al destino dentro de cinco minutos (es decir, 4 minutos 59 segundos o menos) de la hora de llegada prevista

para Londres y el Sudeste o servicios regionales, o 10 minutos (es decir, 9 minutos 59 segundos o menos) para servicios de larga distancia. Cuando un tren no recorre toda su ruta planificada haciendo escala en todas las estaciones programadas, se cuenta como una falla de PPM.

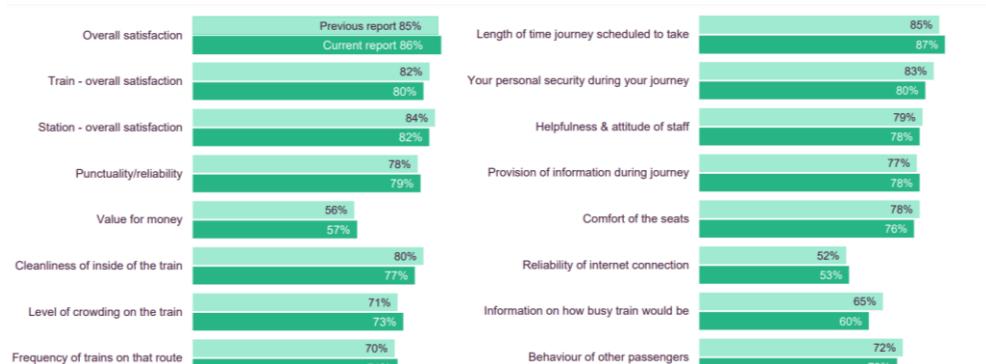
En el reporte de junio y julio de 2023 [95], estos indicaron como ha sido su PPM desde 2007 hasta 2019 y como este se compara con la satisfacción general de los pasajeros con el viaje. Esta medida es obtenida en la Encuesta Nacional de Pasajeros Ferroviarios (NRPS por sus siglas en inglés) [96] realizada dos veces por año, donde se evalúan varios aspectos del servicio prestado como se observa en la figura 20.

Figura 19. PPM vs. NRPS para Network Rail.



Fuente: Adaptado de “Public performance measure and delay responsibility” [Gráfico], de Network Rail, (2023). Disponible en: <https://www.networkrail.co.uk/who-we-are/how-we-work/performance/railway-performance/public-performance-measure-and-delay-responsibility/>

Figura 20. Cambio en los niveles de satisfacción en el servicio de Network Rail entre los reportes de septiembre y agosto.



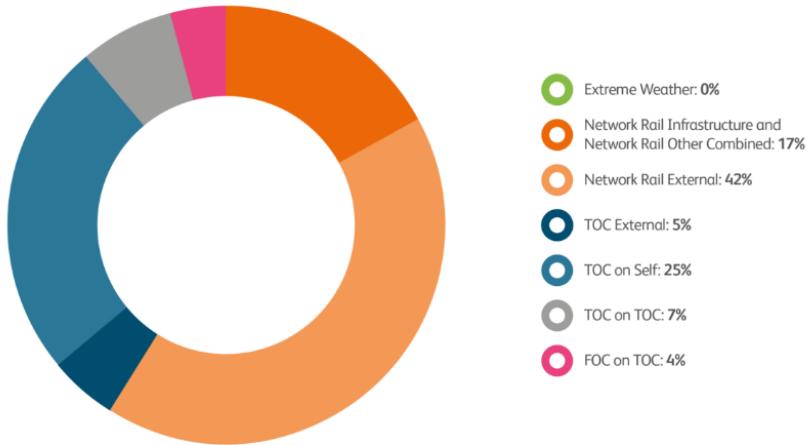
8 September 2023 report. Satisfaction questions are based on the most recent train journey made within seven days of being surveyed. The current satisfaction values are the average of the two surveys conducted in the last four weeks; the ‘previous report’ values are the average of the three surveys conducted in the previous four weeks. Base sizes per aspect vary: current report from 389 to 517, previous report from 438 to 539.

transportfocus

Fuente: Adaptado de “Change in satisfaction levels since last report” [Gráfico], de Network Rail, (2023). Disponible en: <https://d3cez36w5wymxj.cloudfront.net/wp-content/uploads/2023/09/08093439/Rail-User-Survey-8-September.pdf>

Asimismo, para identificar las áreas de posible mejora en el servicio, estos miden quién o qué fue responsable de los retrasos en los trenes de pasajeros de 3 minutos o más como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Responsabilidad por retrasos para el periodo entre junio 25 y julio 22 de 2023 para Network Rail.



Fuente: Adaptado de “Delay responsibility” [Gráfico], de Network Rail, (2023). Disponible en: <https://www.networkrail.co.uk/who-we-are/how-we-work/performance/railway-performance/public-performance-measure-and-delay-responsibility/>

A Network Rail se le asigna la responsabilidad de los retrasos causados por factores externos como el clima, la entrada ilegal, el vandalismo, el robo de cables y las muertes. Las categorías incluyen:

- **Clima extremo:** Condiciones climáticas excepcionales más allá del diseño de la infraestructura.
- **Causas de la red ferroviaria:** Cuestiones que podrían haberse evitado, como problemas operativos, daños o fallos de la infraestructura del ferrocarril, como vías, señalización o puntos.
- **Red ferroviaria externa:** Problemas que Network Rail no podría haber previsto, como vehículos que chocan con puentes e intrusos en la línea.
- **TOC externo:** Problemas que la compañía ferroviaria no podía haber previsto, como accidentes o enfermedades de los pasajeros en los trenes, daños a los trenes por vehículos de carretera o el cierre forzoso de una estación.
- **TOC sobre sí mismo:** Problemas que la compañía ferroviaria podría haber evitado, como trenes defectuosos o falta de personal ferroviario.
- **TOC sobre TOC:** Una compañía de trenes tiene sus servicios retrasados por las acciones de otra compañía de trenes, como un tren retrasado de una compañía que provoca retrasos en otros trenes.
- **FOC sobre TOC:** Retrasos causados por trenes de mercancía en la red.

Como se puede apreciar, los retrasos causados por factores que pudieron haberse evitado, y que estaban bajo el control de la compañía ferroviaria (“Causas de la red ferroviaria” y “TOC sobre sí mismo”), representan el 42% de las responsabilidades totales. En otras palabras, la satisfacción del pasajero se ve reducida en casi la mitad de las ocasiones por factores que pudieron ser evitados si se hubiese tenido un mejor monitoreo y gestión de los activos ferroviarios.

En este orden de ideas, para prestar un mejor servicio, el más importante factor es la seguridad del pasajero. Un enfoque en seguridad se traduce en una mejor gestión de activos, pues se requiere de un control minucioso de los diversos elementos que pueden resultar en un imprevisto, y que, en ciertas ocasiones, puede escalar a accidentes que ponen en riesgo la seguridad del pasajero.

El reporte de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC por sus siglas en inglés), en su reporte de seguridad del 2022 [97], indica que los accidentes por causas externas han ido disminuyendo desde el 2016, sin embargo, en los últimos dos años, el número de accidentes por causas internas ha aumentado un 20.78% (Figura 22) en los sistemas ferroviarios de los países miembros de la UIC. Las causas internas abarcan la infraestructura, material rodante, factores humanos y usuarios del ferrocarril, mientras que las externas hacen referencia a terceros, clima y medio ambiente.

Figura 22. Causas de accidentes en los sistemas ferroviarios de la UIC.



Fuente: Adaptado de “2.02a Accidents per internal / external causes” [Gráfico], de UIC, (2022). Disponible en: https://safetydb.uic.org/IMG/pdf/uic_safety_report_2022.pdf

Las causas externas referentes a las condiciones climáticas se pueden asociar con la causa directa 5 del problema central:

5. Condiciones climáticas extremas.

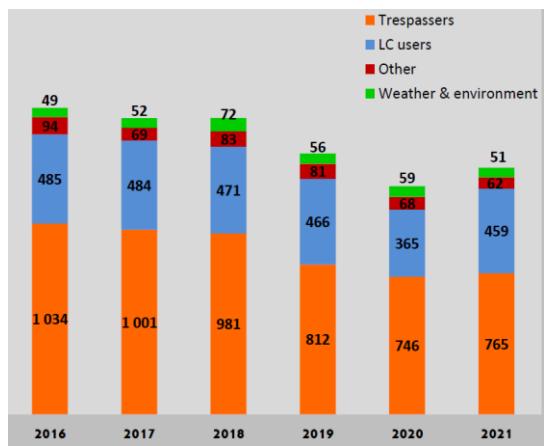
Esta, como parte de las causas indirectas, tiene:

5.1 Afectaciones directas en la infraestructura ferroviaria.

5.2 Falta de adaptación de la infraestructura.

Como lo indica la figura 23, un 3.8% de los accidentes producidos por causas externas se atribuyen al clima y medio ambiente.

Figura 23. Accidentes por causas externas.



Fuente: Adaptado de “2.04a Accidents per external causes” [Gráfico], de UIC, (2022). Disponible en: https://safetydb.uic.org/IMG/pdf/uic_safety_report_2022.pdf

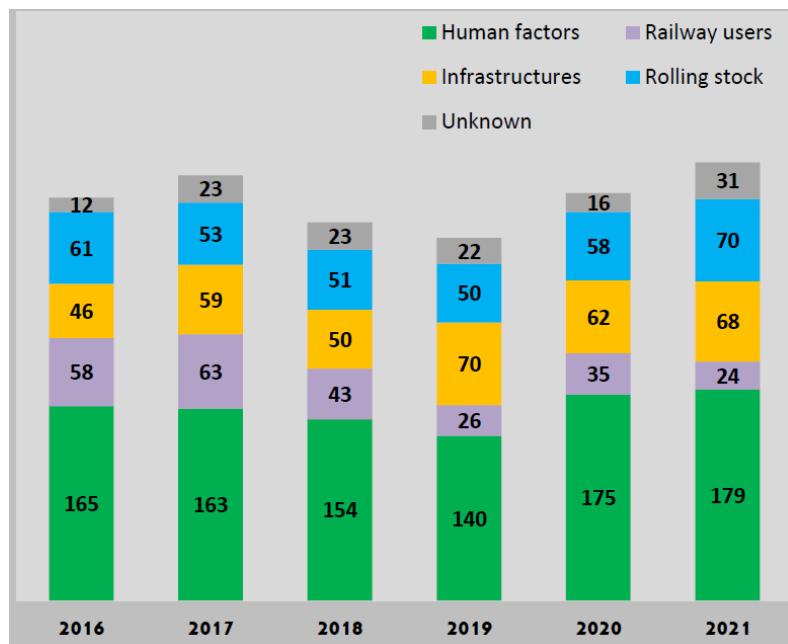
Las causas internas de accidentes son las que pueden mitigarse y prevenirse con una adecuada gestión de activos. Según el reporte, para 2021, el 19,9% de los accidentes fueron producto de causas internas como se muestra en la tabla 4. El número de accidentes por causas internas en 2021 fue el mayor de todo el sexenio como lo revela la figura 24, con incrementos en todas las categorías con respecto a 2020, a excepción de la categoría “Usuarios ferroviarios”.

Tabla 4. Causas internas de accidentes en los sistemas ferroviarios de los miembros de la UIC para 2021.

INTERNAL CAUSES 19,9%	INFRASTRUCTURES 4,0%	Tracks and structures	2,5%
		Energy system	1,1%
		Other or not specified	0,3%
	ROLLING STOCK 4,1%	Running gear	2,1%
		Other or not specified	2,0%
		Track and switch maintenance staff	1,4%
HUMAN FACTORS (Railway staff & subcontractors) 10,3%	HUMAN FACTORS (Railway staff & subcontractors) 10,3%	Traffic operating and signalling staff	2,0%
		Train drivers	2,4%
		Other or not specified	4,4%
	RAILWAY USERS 1,5%	Passengers	1,4%
		Other or not specified	0,1%

Fuente: Adaptado de “1.03 Main causes of accidents” [Gráfico], de UIC, (2022). Disponible en: https://safetydb.uic.org/IMG/pdf/uic_safety_report_2022.pdf

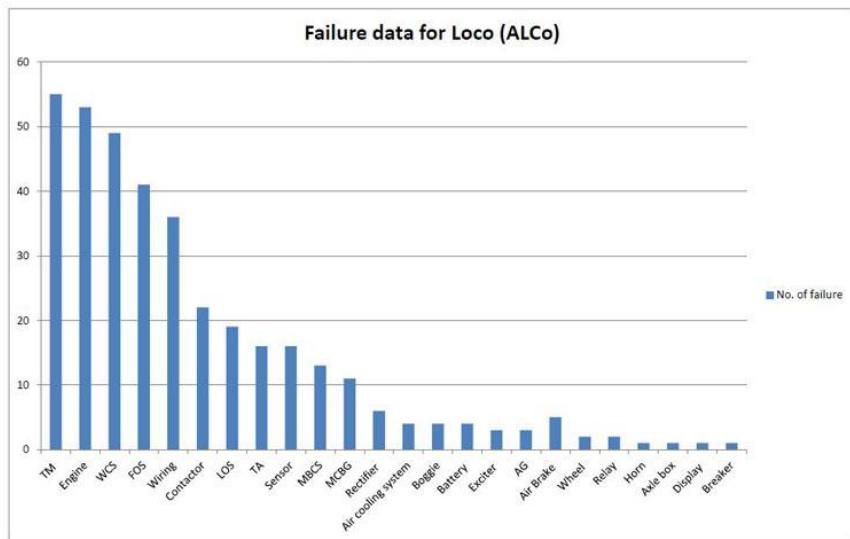
Figura 24. Accidentes por causas internas.



Fuente: Adaptado de “2.03a Accidents per internal causes” [Gráfico], de UIC, (2022). Disponible en: https://safetydb.uic.org/IMG/pdf/uic_safety_report_2022.pdf

Dentro de las causas internas previamente mencionadas, los accidentes producto de fallas en el material rodante es donde la gestión de activos y el monitoreo de condición pueden tener un mayor impacto positivo. Priya Agrawal, ingeniera jefa adjunta de señales y telecomunicaciones en Indian Railways [98], en un artículo para Global Railway Review, señala, como se muestra en la figura 25, que el 70-80% de las fallas en locomotoras se deben a subsistemas específicos. Esta estadística aplica a todos los tipos de material rodante, y es que, a menudo, se dedica demasiado tiempo al mantenimiento de los subsistemas que pueden no ser la causa real de las averías, y se dedica un tiempo insuficiente al mantenimiento de los subsistemas que son más propensos a averiarse. Es importante reducir el tiempo de inactividad de los subsistemas que fallan con frecuencia mediante técnicas de monitoreo de condición y análisis predictivo para reducir el tiempo de inactividad general del material rodante y, en consecuencia, mejorar el servicio. Para ello, tecnologías como sensores en tiempo real y análisis de datos son valiosos aliados para facilitar los procesos de toma de decisiones e identificar activos de bajo rendimiento, de modo que se preste atención a esos activos según su condición.

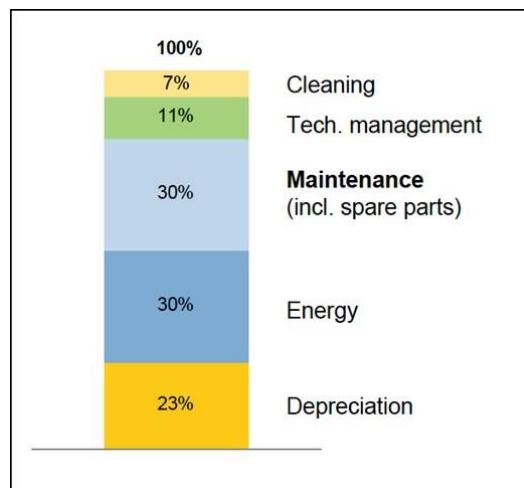
Figura 25. Datos de falla de una locomotora.



Fuente: Adaptado de “Failure data for Loco (ALCo)” [Gráfico], de Agrawal, P., (2020). Disponible en: <https://www.globalrailwayreview.com/article/100714/big-data-analytics-asset-management-indian-railways/>

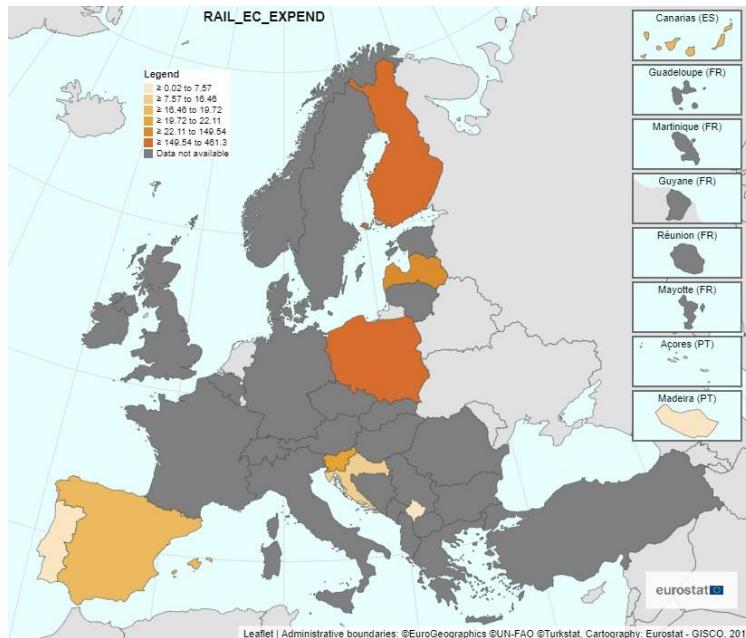
Para hacer frente a estas fallas, los operadores ferroviarios gastan ingentes montos de dinero en el mantenimiento de estos subsistemas. Piers Connor, consultor principal de PRC Rail Consulting Ltd., advierte en su página “The Railway Technical Website” [99] que, en el ciclo de vida de un tren de alta velocidad, el mantenimiento representa el 30% de los costes de ciclo de vida (Figura 26). Aunque la estadística hace referencia a los trenes de alta velocidad, esta tendencia es relativamente igual para los demás tipos de material rodante. Este gran gasto se ve reflejado en los fondos destinados al mantenimiento del material rodante en los principales países de la Unión Europea (Figura 27). Como lo indica Eurostat [51] en la figura 26, Polonia fue el país con mayor gasto en mantenimiento de material rodante dentro de los países con información disponible. Este invirtió 461.3 millones de euros en esta área, seguido por Finlandia con 175, Latvia con 22.24, Slovenia con 21.84, España con 17.59, Croacia con 15.9, Portugal con 5.903, y Kosovo con 0.02.

Figura 26. Costo del mantenimiento de un tren de alta velocidad como parte de los costos de su ciclo de vida.



Fuente: Adaptado de “Figure 1: A chart showing the cost of a train’s maintenance as part of its life cycle costs.” [Gráfico], de The Railway Technical Website, (2023). Disponible en: <http://www.railway-technical.com/trains/train-maintenance/>

Figura 27. Gastos en mantenimiento del material rodante en las principales empresas ferroviarias de la UE.



Fuente: Adaptado de “Nature of expenditure in principal railway enterprises, by type of expenditure” [Gráfico], de Eurostat, (2023). Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail_ec_expend/default/map?lang=en

De estos gastos en mantenimiento de material rodante, un artículo de la revista Pertanika (2022) [100], después de realizar una investigación exhaustiva de un número sustancial de artículos publicados, propone que los costos influyentes más altos en el mantenimiento son los costos de repuestos, ciclo de vida, y mantenimiento preventivo (Tabla 5).

Tabla 5. Lista de variables influyentes identificadas en los costes de mantenimiento del material rodante.

Table 3
List of identified influential rolling stock maintenance costs variable

No	Variable	f	(%)	No	Variable	f	(%)
1	Spare Part Cost	15	13.8	15	Inspection Cost	4	3.7
2	Life Cycle Cost	12	11	16	Downtime Cost	4	2.8
3	Preventive Maintenance Cost	7	6.4	17	Direct Cost	3	2.8
4	Workforce	5	4.6	18	Opportunity Cost	2	1.8
5	Corrective Maintenance Cost	5	4.6	19	Training Cost	2	1.8
6	Cost of Ownership	5	4.6	20	Hazard Cost	2	1.8
7	Shunting cost	5	4.6	21	Penalty Cost	2	1.8
8	Equipment/ Machinery	4	3.7	22	Overhaul	2	1.8
9	Storage Cost	4	3.7	23	Variable Cost	2	1.8
10	Depreciation Cost	4	3.7	24	Indirect Cost	2	1.8
11	Repair Cost	4	3.7	25	Insurance	1	0.9
12	Logistic	4	3.7	26	Replacement Cost	1	0.9
13	Fixed Cost	4	3.7	27	Incident Cost	1	0.9
14	Inventory Cost	4	3.7		Grand Total	110	100

Note: f = frequency

Fuente: Adaptado de “Table 3 - List of identified influential rolling stock maintenance costs variable” [Tabla], de Pertanika Journal, (2022). Disponible en: <https://shorturl.at/mrRY2>

Con base en todo lo anterior, se puede decir que tanto los crecientes accidentes por causas internas, y el consecuente gasto significativo en mantenimiento, se deben en gran medida a la causa directa 4 y causa indirecta 4.1 del árbol de problemas:

4. Selección incorrecta de los indicadores de rendimiento.

4.1 Falta de conocimiento de las causas de falla.

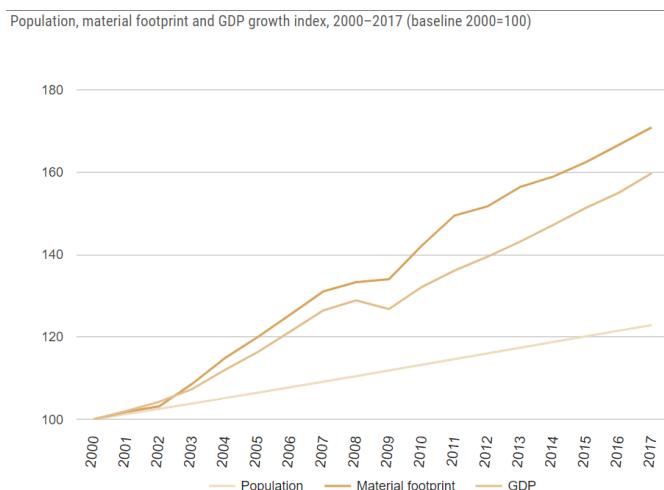
La selección inadecuada de los indicadores de desempeño de los activos ferroviarios lleva a un monitoreo inapropiado de los subsistemas. Esto se traduce a una ineficiente gestión de activos, que a su vez deriva en el desconocimiento de las causas de falla y en consecuencia aumenta los accidentes por la falta de estrategias de mantenimiento aptas.

Finalmente, otro de las dimensiones esenciales que todo operador ferroviario debe considerar en todas las etapas del servicio, desde la propia concepción del proyecto ferroviario, pasando por la construcción de la infraestructura y material rodante, hasta la operación, es la ambiental. No solo esta permite cuantificar la eficiencia energética del sistema, sino que también es un aspecto fundamental en el servicio indirecto a los usuarios y la sociedad en general. Esta está directamente enlazada con el problema central y con el objetivo de desarrollo sostenible selecto, pues una de las consecuencias directas de la inadecuada gestión de activos, es el incremento de la huella material; y una causa directa de este mismo problema es la:

7. Falta de tecnologías modernas de ahorro de energía y disminución de consumo.

Para ilustrar mejor el grave problema de consumo de materiales a nivel mundial, las Naciones Unidas [47] ha llevado registro de la huella material a lo largo de los años. La “huella material” se refiere a la cantidad total de materias primas extraídas para satisfacer las demandas de consumo final. Es una indicación de las presiones que se ejercen sobre el medio ambiente para apoyar el crecimiento económico y satisfacer las necesidades materiales de las personas. La huella material global aumentó de 43 mil millones de toneladas métricas en 1990 a 54 mil millones en 2000 y 92 mil millones en 2017, un aumento del 70 por ciento desde 2000 y del 113 por ciento desde 1990 (Figura 28). La tasa de extracción de recursos naturales se ha acelerado desde 2000. Sin una acción política concertada, se prevé que crecerá hasta 190 mil millones de toneladas métricas para 2060.

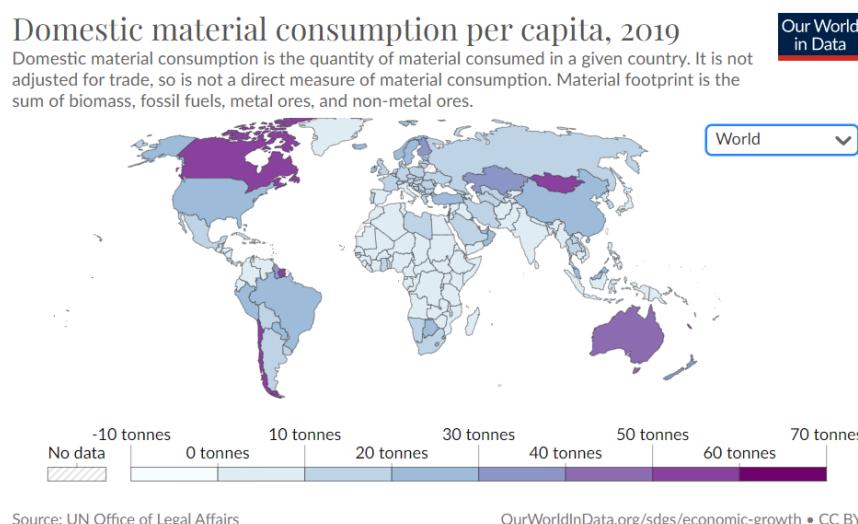
Figura 28. Población, huella material e índice de crecimiento del PIB, 2000-2017.



Fuente: Adaptado de “Population, material footprint and GDP growth index, 2000–2017 (baseline 2000=100)” [Gráfico], de UN, (2023). Disponible en: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-12/>

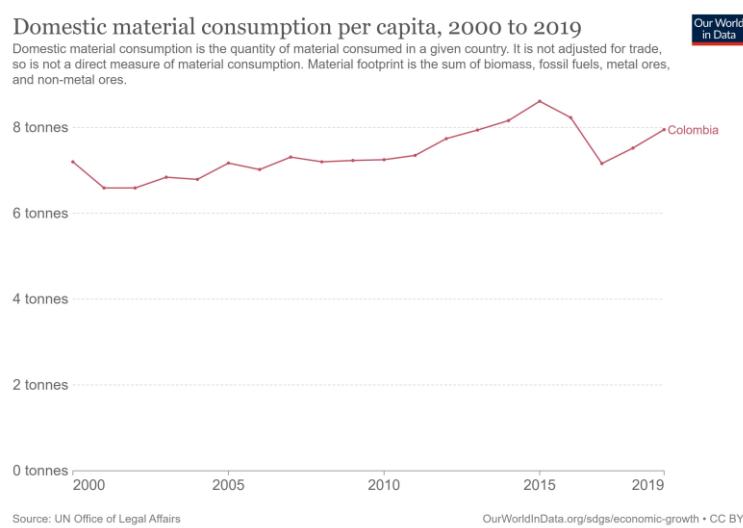
El consumo doméstico de material per cápita es otra de las medidas empleadas para dimensionar la “huella material”. Este es un indicador estándar de contabilidad de flujo de materiales (MFA por sus siglas en inglés) e informa el consumo aparente de materiales en una economía nacional, ósea, el consumo promedio por habitante. Como lo muestra la figura 29 de la organización Our World Data [48], el consumo doméstico de material per cápita es considerablemente elevado en las Américas, Asia, Europa y Oceanía. En el caso de Colombia, como se observa en la figura 30, este consumo ha ido aumentando paulatinamente en los últimos años.

Figura 29. Consumo doméstico de material per cápita en 2019 en el mundo.



Fuente: Adaptado de “Domestic material consumption per capita, 2019” [Gráfico], de UN, (2019). Disponible en: <https://shorturl.at/otCX0>

Figura 30. Consumo doméstico de material per cápita entre 2000 y 2019 en Colombia.

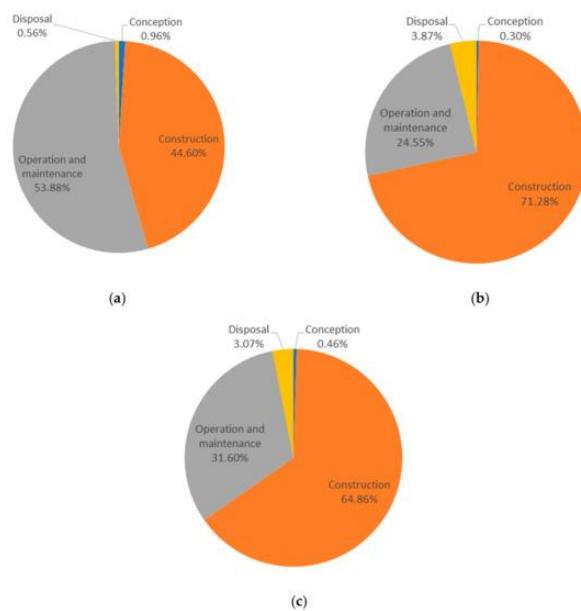


Fuente: Adaptado de “Domestic material consumption per capita, 2019” [Gráfico], de UN, (2019). Disponible en: <https://ourworldindata.org/grapher/domestic-material-consumption-per-capita?tab=chart&facet=none&country=~COL>

Entrando en materia de los sistemas ferroviarios, Kaewunruen, Sresakoolchai, y Peng, para un artículo de la revista Sustainability (2020) [49], realizan una evaluación del ciclo de vida (LCA) y costo de ciclo de vida (LCC) del ferrocarril de alta velocidad Beijing-Shanghai. En este determinan el consumo de energía, las emisiones de carbono y los costos del sistema ferroviario desde la perspectiva del ciclo de vida para 4 etapas de la vía, el movimiento de tierras, y el sistema en general. Aunque el estudio esté enfocado en un caso particular, las proporciones propuestas en el artículo se pueden generalizar con cierta discreción a los demás tipos de servicios ferroviarios.

Empezando por las emisiones de carbono, la etapa de operación y mantenimiento contribuye principalmente a las emisiones de carbono de la estructura de la vía, mientras que la etapa de construcción es la etapa que más carbono produce, tanto para el trabajo de movimiento de tierra, como para todo el proyecto en general (Figura 31). Con base en la investigación, se encuentra que las emisiones de carbono en el HSR Beijing-Shanghai provienen principalmente de las etapas de construcción y de operación y mantenimiento, siendo las emisiones de carbono de la etapa de construcción (9964,83 kilo toneladas) más del doble de las emisiones en la etapa de operación y mantenimiento (4854,66 kilo toneladas).

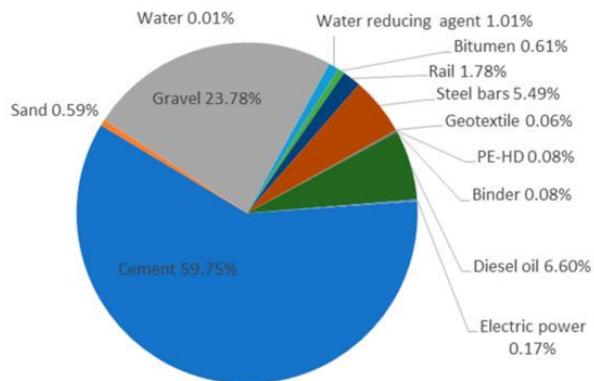
Figura 31. Porcentajes de emisiones de carbono de: (a) la estructura de la vía; (b) los trabajos de movimiento de tierras; c) todo el sistema ferroviario.



Fuente: Adaptado de “Figure 5. Carbon emission percentages of: (a) the structure of track; (b) the structure of earthwork; (c) the entire rail system.” [Gráfico], de Sustainability Journal, (2020). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/206>

La figura 32 muestra las emisiones de carbono de diversos materiales durante la etapa de construcción. Cabe señalar que las emisiones de carbono del diésel y la energía eléctrica son iguales a la cantidad de carbono emitida por la maquinaria de construcción. El resto de las emisiones de carbono provienen de los materiales de construcción.

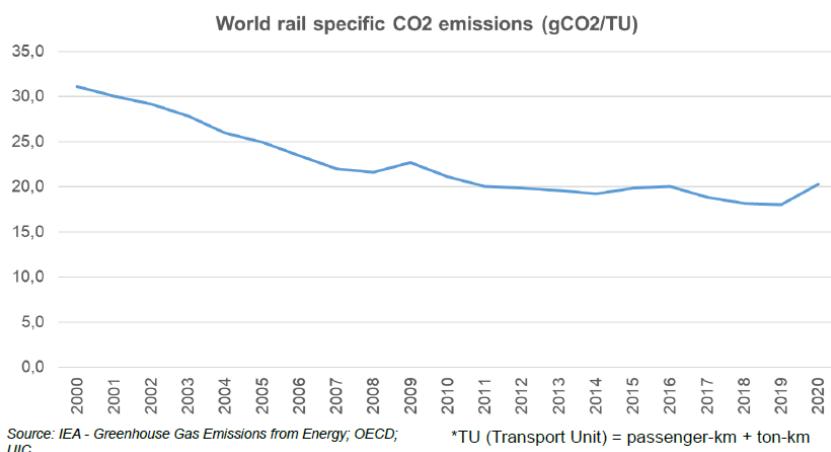
Figura 32. Porcentajes de emisión de carbono de los materiales en etapa de construcción de todo el sistema ferroviario.



Fuente: Adaptado de “Figure 6. Carbon emission percentages of materials in construction stage of the entire rail system.” [Gráfico], de Sustainability Journal, (2020). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/206>

Aunque las emisiones siguen siendo elevadas, el Informe de Sostenibilidad Ferroviaria Mundial de la UIC (2022) [25] informa que, durante los últimos 20 años, la industria ferroviaria ha mejorado continuamente su desempeño para apoyar la acción sobre el ODS 13, reduciendo su intensidad de carbono (indicador 13.2.2, “Emisiones totales de gases de efecto invernadero por año”) como lo evidencia la figura 33.

Figura 33. Emisiones específicas de CO₂ de los sistemas ferroviarios en el mundo (gCO₂/TU).

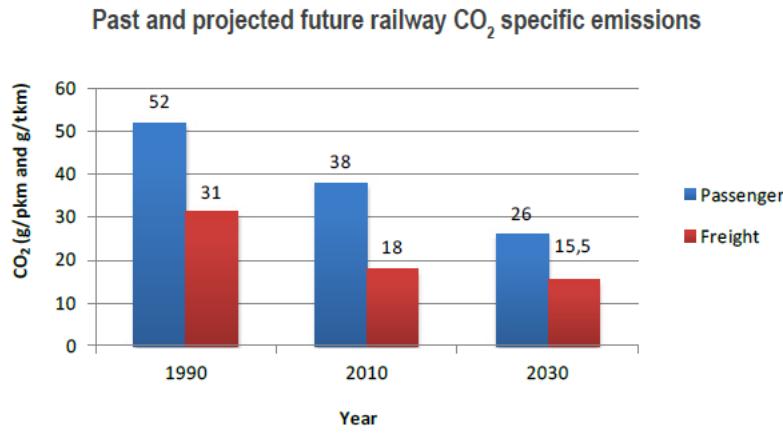


Fuente: Adaptado de “World rail specific CO₂ emissions (gCO₂/TU)” [Gráfico], de UIC, (2020). Disponible en: <https://uic.org/IMG/pdf/global-rail-sustainability-report-2022.pdf>

Esta tendencia descendente es respaldada por el reporte de Datos y Cifras del Transporte Ferroviario y Medio Ambiente de la UIC (2015) [101]. Para ayudar a impulsar nuevas mejoras en el sector ferroviario, en 2010 los miembros de la UIC y la CER acordaron conjuntamente la estrategia “Avanzando hacia la movilidad sostenible: Estrategia del sector ferroviario europeo 2030 y más allá” para proporcionar un enfoque unificado en el sector ferroviario europeo.

La estrategia compromete a los ferrocarriles europeos a reducir sus emisiones específicas de CO₂ en un 50% de aquí a 2030, en comparación con 1990 como lo indica la figura 34. Además, para 2030, los ferrocarriles europeos reducirán sus emisiones totales de CO₂ derivadas de la operación de trenes en un 30 % en comparación con el año 1990. Adicionalmente, de aquí a 2050 los ferrocarriles europeos se esforzarán por lograr un funcionamiento completamente libre de emisiones de carbono, proporcionando a la sociedad una opción de transporte climáticamente neutra.

Figura 34. Emisiones específicas de CO₂ pasadas y futuras proyectadas para los ferrocarriles europeos.

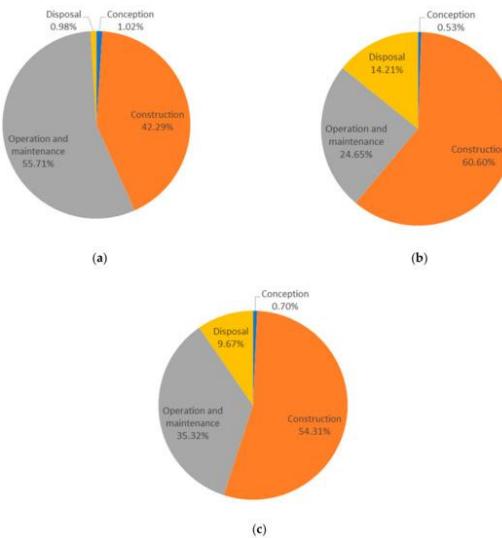


UIC Energy/CO₂ database, and CER/UIC 2012

Fuente: Adaptado de “Past and projected future railway CO₂ specific emissions” [Gráfico], de UIC, (2015). Disponible en: https://uic.org/IMG/pdf/facts_and_figures_2014_v1.0-4.pdf

Pasando ahora al consumo de energía, como lo señala Kaewunruen, et al. en la figura 35, durante los trabajos de tierra, se requiere una gran cantidad de materiales para completar el movimiento de tierras y estos materiales consumen mucha energía durante el proceso de producción. Al mismo tiempo, durante la etapa de operación y mantenimiento del movimiento de tierras, el material requerido es menor que en la etapa de construcción, y las maquinarias también son menos necesarias que en la etapa de construcción, por lo que la construcción consume más energía que la etapa de operación y mantenimiento. Por otro lado, para la estructura de la vía, el material requerido en la etapa de construcción no es tan alto como en los trabajos de tierra. No obstante, el mantenimiento se realiza regularmente durante la etapa de operación y mantenimiento, lo que hace que esta etapa juegue el papel más importante en el consumo de energía en la estructura de la vía.

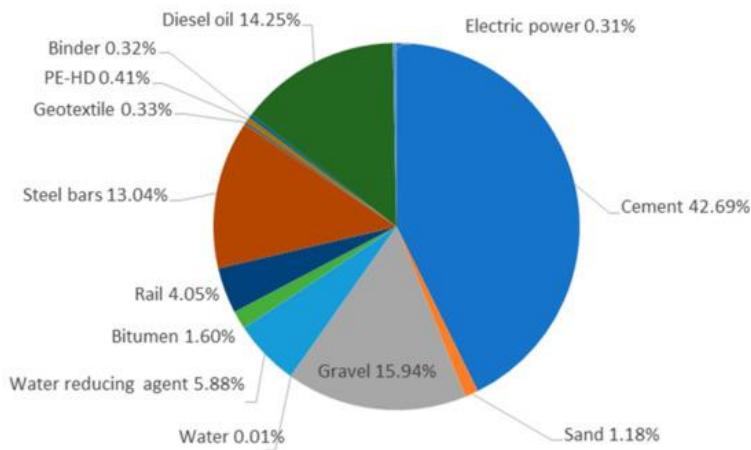
Figura 35. Porcentajes de consumo de energía de: (a) la estructura de la vía; (b) los trabajos de movimiento de tierras; c) todo el sistema ferroviario.



Fuente: Adaptado de “Figure 7. Energy consumption percentages of: (a) the structure of track; (b) the structure of earthwork; (c) the entire rail system.” [Gráfico], de Sustainability Journal, (2020). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/206>

La figura 36 muestra el consumo energético de diferentes materiales durante la etapa de construcción. Al igual que las emisiones de carbono, el consumo energético de las maquinarias de construcción es la suma de la energía consumida por el diésel y la energía eléctrica. Con base en la figura, se puede apreciar que el porcentaje de consumo de energía procedente de los materiales de construcción es el mayor en comparación con el de la maquinaria de construcción. Esto demuestra que la producción de materiales de construcción juega un papel más importante que la energía utilizada durante la etapa de construcción en términos del consumo de energía.

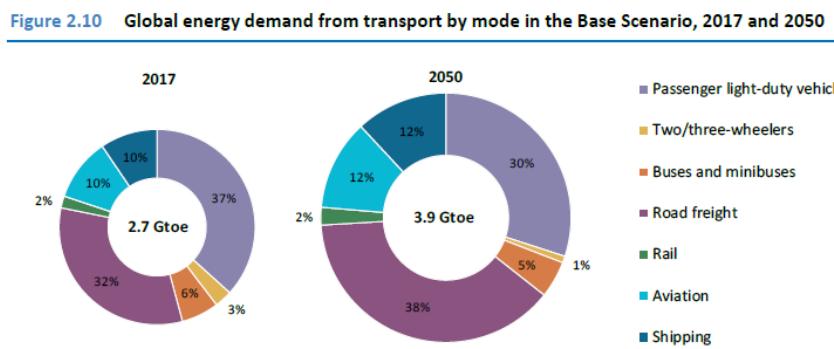
Figura 36. Porcentajes de consumo energético de los materiales en etapa de construcción de todo el sistema ferroviario.



Fuente: Adaptado de “Figure 8. Energy consumption percentages of materials in construction stage of the entire rail system.” [Gráfico], de Sustainability Journal, (2020). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/206>

Para complementar esta información, el informe “The Future of Rail” de la IEA (2019) [28] apunta que, en el Escenario Base, la demanda mundial de energía procedente del transporte aumentará constantemente desde alrededor de 2,7 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) en 2017 a 3,9 Gtoe en 2050, un aumento general de más del 40% (Figura 37).

Figura 37. Demanda global de energía procedente del transporte por modo en el Escenario Base, 2017 y 2050.



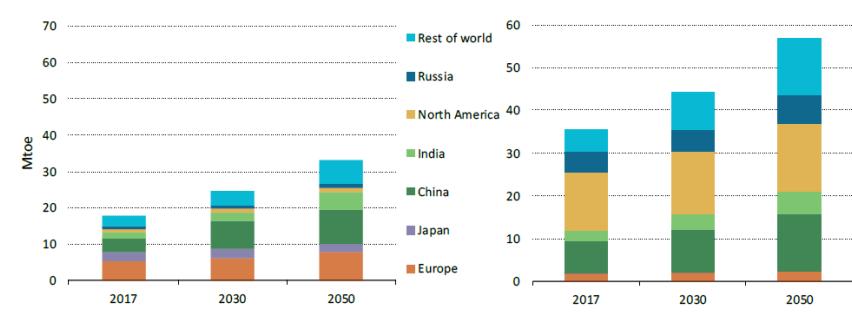
Note: Gtoe = gigatonnes of oil equivalent. Source: IEA (2018b).

Fuente: Adaptado de “Figure 2.10 – Global energy demand from transport by mode in the Base Scenario, 2017 and 2050” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

En este mismo Escenario Base, el ferrocarril, medido por unidad de actividad de transporte, sigue siendo el modo que menos consume energía en el transporte de pasajeros y el segundo modo que menos consume energía en el transporte de mercancías (después del transporte por vías naveables). La proporción de energía ferroviaria requerida por el transporte de pasajeros, como proporción de la demanda total de energía ferroviaria, aumenta del 33% en 2017 al 37% en 2050. En consonancia con el crecimiento de la actividad ferroviaria de pasajeros y mercancías tanto en China como en la India, estos países representan la mayor parte del aumento en el uso de energía en ambas categorías de servicio ferroviario (Figura 38).

Figura 38. Demanda mundial de energía para trenes de pasajeros (izquierda) y mercancías (derecha) en el Escenario Base, 2017, 2030 y 2050

Figure 2.12 Global energy demand for passenger (left) and freight (right) rail in the Base Scenario, 2017, 2030 and 2050



Note: Mtoe = million tonnes of oil equivalent. Source: IEA (2018b).

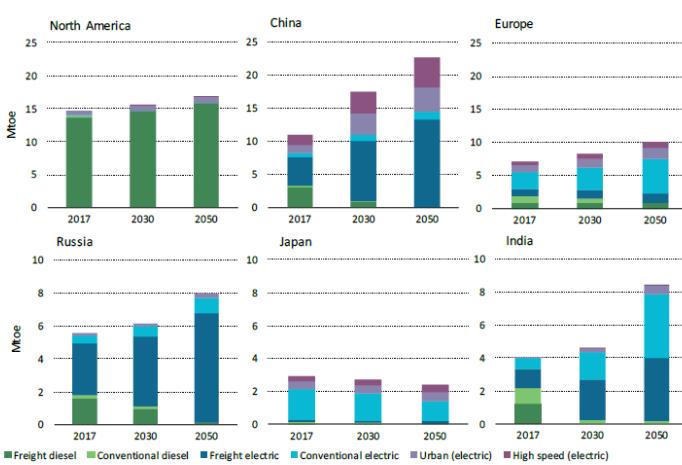
Key message • Energy demand from rail grows in both the passenger and freight sectors (with passenger rail at a faster pace), totalling 90 Mtoe in 2050.

Fuente: Adaptado de “Figure 2.12 – Global energy demand for passenger (left) and freight (right) rail in the Base Scenario, 2017, 2030 and 2050” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

La mayor parte del crecimiento de la demanda de energía ferroviaria se satisface en forma de electricidad en el Escenario Base, el consumo aumenta de cerca de 300 teravatios·hora (TWh) en 2017 a casi 700 TWh en 2050. El uso de diésel en el ferrocarril aumenta solo ligeramente, de 0,56 millones de barriles de petróleo por día (mb/d) en 2017 a 0,58 mb/d en 2050. El transporte ferroviario de pasajeros experimenta el mayor grado de electrificación, influenciado por el despliegue del ferrocarril urbano y el tren de alta velocidad, ambos completamente eléctricos (Figura 39). América del Norte, por su parte, es la única región que no experimenta una electrificación significativa, ya que la mayor parte del transporte ferroviario en esta región se emplea con fines de carga y utiliza diésel. Para 2050, más de la mitad de la demanda mundial de diésel ferroviario será consumida por trenes de carga en América del Norte.

Figura 39. Demanda energética del ferrocarril por región y tecnología en el Escenario Base, 2017, 2030 y 2050.

Figure 2.13 Energy demand from rail by region and technology in the Base Scenario, 2017, 2030 and 2050



Note: The scale in the top three figures (North America, China, Europe) differs from that in the bottom three (Russia, Japan, India).

Source: IEA (2018b).

Fuente: Adaptado de “Figure 2.13 – Energy demand from rail by region and technology in the Base Scenario, 2017, 2030 and 2050” [Gráfico], de International Energy Agency, (2019). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>

Considerando todo lo anterior, es menester incrementar la adopción de tecnologías que conlleven a la mejora de la eficiencia energética y servicio del pasajero, la reducción del consumo material y los tiempos de inactividad, la maximización y minimización de los ciclos de vida y costos de ciclo de vida de activos respectivamente, y, en general, la potenciación del RAMS. Es por este motivo que las proyecciones en el mercado de los sistemas de gestión de activos son tan elevadas. Una eficiente gestión de activos aportaría en gran medida al progreso de estos importantes factores, pero para ello, se requiere de la centralización de los diferentes subsistemas que componen el sistema ferroviario. Debido a la gran oferta de soluciones tecnológicas en el mercado por parte de miles de proveedores, la adopción de estas tecnologías, aunque solucionan los problemas particulares para los que fueron adquiridos, no son compatibles informáticamente unas con otras. Esto impide la adopción de estrategias de planificación de la operación, mantenimiento, innovación, y seguridad que abarquen todos los activos y la compleja red de relaciones que tienen unos con otros.

6. ESTADO DEL ARTE

Con base en la norma ISO 55001 [52], dentro de los requerimientos de un sistema de gestión de activos se encuentra el contexto de la organización, liderazgo, planeación, soporte, evaluación del rendimiento, y mejora. En la industria ferroviaria, más específicamente en el área de planeación, evaluación del rendimiento, y mejora, la gestión de activos representa una materia de gran interés. Comúnmente en la industria ferroviaria, en especial los sistemas de transporte latinoamericanos examinan los subsistemas de manera independiente, particularizando cada activo con base en su funcionalidad y aplicando soluciones tecnológicas descentralizadas e incompatibles informáticamente. Esta dispersión de la información impide identificar la relación entre el rendimiento del activo y demás factores de interés relacionados con la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS por sus siglas en inglés). En el área de mantenimiento, esta resulta ser una problemática de gran relevancia, pues una correcta gestión del mantenimiento traería beneficios tales como:

- a. Aumento de la vida útil de los activos
- b. Reducción de los costos de mantenimiento
- c. Incremento en la seguridad del sistema ferroviario
- d. Mejor control y planeación de la explotación del material rodante
- e. Prevención de daños imprevistos
- f. Minimización de los tiempos de espera no planeados

El subsistema de bogies, encargado del soporte, estabilidad y absorción de vibraciones del material rodante durante su operación, se compone de varios activos que juegan un papel fundamental en el correcto funcionamiento de este subsistema. Entre estos, los rodamientos son uno de los más críticos elementos en la seguridad y disponibilidad del sistema, dos factores que dentro del contexto de las organizaciones de tránsito masivo toman prioridad por encima de cualquier otro. El mantenimiento de estas piezas es de tipo preventivo, lo que en otras palabras representa frecuencias de intervención constantes que interrumpen el ciclo funcional del rodamiento, y en consecuencia aumentan el costo de ciclo de vida del activo. Para dar solución a esto, un mantenimiento basado en la condición es imperioso. Un sistema de monitoreo y diagnóstico de condición de los rodamientos, que entra en la categoría de evaluación del rendimiento de la norma ISO 55001, admitiría la prolongación del periodo funcional del activo sin afectar la seguridad y maximizando la disponibilidad del material rodante. Esto a su vez daría cabida a un amplio horizonte de mejora, donde, por medio de un análisis de costos de ciclo de vida basado en la confiabilidad (LCCA por sus siglas en inglés), las decisiones sobre los períodos y métodos de mantenimiento serían optimizadas a la vista de gastos operacionales y de capital.

Rodamientos de bogies ferroviarios

Los bogies son componentes vitales en los vehículos ferroviarios, conectando los trenes con los rieles y comprendiendo elementos esenciales como ruedas, ejes, rodamientos, sistemas de suspensión, tracción y frenado [35]. Un sistema patentado propuesto por Troy B. Jones del Charles Stark Draper Laboratory en los Estados Unidos [36] emplea sensores instalados en los bogies y las ruedas de un tren para evaluar su estado. Este método compara las señales recopiladas con valores esperados de funcionamiento normal y detecta posibles anomalías que podrían indicar un fallo potencial o real en el sistema, ya sea en los rodamientos, las ruedas, la infraestructura de las vías, el descarrilamiento o los ejes. Además, este sistema aprovecha la energía generada por la rotación del eje para alimentar los sensores y facilitar la comunicación con la nube, permitiendo un monitoreo continuo y eficiente de la condición de los bogies y las ruedas del tren.

SKF

SKF [53], una destacada marca sueca en el mercado mundial de rodamientos con más de 100 años de experiencia proporciona una guía de 8 pasos para garantizar el funcionamiento óptimo de los rodamientos en diversas aplicaciones. Estos pasos incluyen entender los requisitos de la aplicación, seleccionar el tipo y tamaño de rodamiento adecuados, considerar la lubricación correcta, calcular la velocidad límite y la temperatura de funcionamiento, determinar las tolerancias dimensionales y geométricas, elegir la versión apropiada del rodamiento, seleccionar sellos externos, llevar a cabo un montaje y desmontaje precisos, y establecer un programa de inspección y monitoreo para prevenir fallos en los rodamientos. Estos procesos son cruciales para optimizar la vida útil y el rendimiento de los rodamientos en una amplia variedad de aplicaciones industriales.

Aplicación de Machine Learning para Mantenimiento Basado en la Condición de Rodamientos de Ejes de Trenes.

En un artículo de la Universidad de Sevilla, los autores A. Crespo, A. Carmona, J. A. Marcos, J. Navarro [54], proponen utilizar métodos de analítica predictiva, big data y machine learning para diseñar planes de mantenimiento basados en la condición de los rodamientos de ejes de trenes, abordando los desafíos en términos de seguridad, confiabilidad y disponibilidad en sistemas ferroviarios. Se destacan los rodamientos de ejes como piezas críticas y se enfocan en el monitoreo de la temperatura como indicador clave. Se lleva a cabo un estudio de caso en la red ferroviaria de Kazajstán, donde se implementa un modelo predictivo basado en machine learning que logra identificar rodamientos dañados con una precisión del 100% a cualquier velocidad del tren, lo que demuestra el potencial de estas técnicas para mejorar la eficiencia y la seguridad en el mantenimiento ferroviario.

Técnica Innovadora para Detección de Fallos en Rodamientos: Empirical Wavelet Transform (EWT)

En el artículo de la Universidad Xi'an Jiaotong en China, los autores H. Cao, F. Fan, K. Zhou, y Z. He [55] presentan un innovador método llamado "empirical wavelet transform" (transformada ondícula empírica) como una alternativa al análisis convencional de señales de vibraciones para la detección de fallos en rodamientos. Este método se basa en el "empirical mode decomposition" (descomposición en modos empíricos) y se implementa en tres pasos para descomponer una señal multicomponente en funciones de modo intrínseco (IMF). Se valida la robustez de este método utilizando señales simuladas y señales reales de rodamientos. Los resultados demuestran que el método EWT es resistente al ruido y efectivo para identificar modos característicos de fallos en los rodamientos, lo que lo convierte en una herramienta prometedora para el diagnóstico de condiciones de rodamientos en aplicaciones prácticas.

Sistemas de monitoreo y diagnóstico de condición ferroviarios

Los sistemas de monitoreo y diagnóstico ferroviario son sistemas altamente tecnológicos y especializados que emplean IoT, técnicas de procesamiento de imágenes e inteligencia artificial (AI) para supervisar y evaluar las condiciones de las vías y los componentes ferroviarios. Estos sistemas buscan garantizar la seguridad, eficiencia y confiabilidad del transporte ferroviario, al permitir una detección temprana de anomalías y fallas, y al brindar una respuesta efectiva a través de sistemas de alarma y notificación. Su aplicación contribuye significativamente a mejorar la calidad y seguridad del transporte ferroviario en un mundo cada vez más dependiente de este medio de transporte.

El Sistema 6C: Tecnologías Clave para la Eficiencia y Seguridad del Ferrocarril de Alta Velocidad en China

El artículo de la Universidad Southwest Jiaotong [37] destaca el sistema ferroviario de alta velocidad en China y su arquitectura 6C compuesta por seis subsistemas y un centro de datos. Estos subsistemas, como el CPCM-1C, CCVM-2C, CCLM-3C y CCHM-4C, trabajan en conjunto utilizando tecnologías clave, como cámaras CCD de alta velocidad y algoritmos de coincidencia de plantillas, para medir parámetros críticos y garantizar la eficiencia y seguridad de la red ferroviaria. Además, se emplean técnicas de procesamiento de datos y análisis multidimensional de Big Data para gestionar y analizar la gran cantidad de información recopilada. En resumen, el sistema 6C y sus tecnologías aseguran la detección precisa y el seguimiento de los sistemas pantógrafo-catenaria, mejorando la operación y confiabilidad del sistema ferroviario de alta velocidad en China.

Tecnología IoT y Procesamiento de Imágenes para Monitoreo Ferroviario sin Contacto

El artículo de la Universidad de Firat [38] presenta un enfoque innovador para monitorear las condiciones de las vías férreas utilizando Internet de las cosas (IoT) y procesamiento de imágenes. Se instalan postes de monitoreo a lo largo de las vías equipados con cámaras y sensores inalámbricos que capturan imágenes y las envían a una computadora central. El procesamiento de imágenes y la visión artificial se utilizan para extraer características significativas y diagnosticar posibles fallas, como desgastes en las tiras colectoras o problemas en la alineación del pantógrafo. Si se detecta una anomalía, se activa un sistema de alarma para garantizar la seguridad y eficiencia del transporte ferroviario, ofreciendo un método sin contacto para el monitoreo de condiciones ferroviarias.

Sistema de Monitoreo de Correas Transportadoras con Fibra Óptica Distribuida

Los autores Mario Francisco Rendic Muñoz, Yerko Luciano Casanova Silva y Juan Francisco Araya Troncoso [39] propusieron una patente para un sistema de monitoreo continuo de correas transportadoras basado en fibra óptica distribuida. Este sistema consta de varias secciones, incluyendo la generación de pulsos ópticos, amplificación de señal, prueba con fibra óptica en la correa, detección de luz y adquisición de datos, y procesamiento de datos. Utiliza la retro-dispersión lumínica en la fibra óptica distribuida a lo largo de la correa transportadora como un sensor continuo para detectar cambios y perturbaciones en la condición de la correa, permitiendo a los operarios tomar medidas preventivas y correctivas.

Sistema Insigth Rail de SKF

El sistema SKF Insight Rail de SKF [56] es una solución de monitoreo de condición no intrusiva y liviana diseñada para material rodante ferroviario. Se instala rápidamente con cambios técnicos mínimos, y sus sensores miden vibración, temperatura y velocidad de la rueda y el rodamiento. Las notificaciones de anomalías se envían a través de una aplicación y se integran fácilmente en paneles de control existentes. Esto permite anticipar problemas y optimizar los intervalos de mantenimiento, reduciendo los costos y reemplazos de rodamientos hasta en un 30%. Los datos se envían a la nube, y las alarmas se visualizan en la aplicación y la interfaz web, proporcionando información crítica para el mantenimiento eficiente de los sistemas ferroviarios.

Guia de introduccion al monitoreo de vibraciones

Esta guía [57] proporciona una introducción a los métodos de análisis de monitoreo de condiciones utilizados en el mantenimiento de maquinaria. Su objetivo principal es informar a los trabajadores sobre métodos comunes de análisis, estableciendo una base para comprender conceptos de análisis de maquinaria y destacando la importancia de distinguir entre la detección y el análisis de la causa raíz de problemas en la maquinaria. Se enfoca en el análisis de vibración, detallando técnicas de medición, análisis de forma de

onda en el dominio del tiempo y análisis de espectro de frecuencia mediante FFT, así como en la diferencia entre mediciones en línea y fuera de línea. También hace referencia a estándares internacionales relacionados con el monitoreo de vibraciones y alienta a consultar recursos de referencia de los fabricantes para obtener recomendaciones específicas y estándares de la industria.

Norma sobre Monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas BS ISO 17359:2018

La norma BS ISO 17359:2018 desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) [58] ofrece pautas generales para la implementación efectiva de sistemas de monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas industriales. Su propósito es ayudar a las organizaciones a detectar y evaluar problemas de funcionamiento y degradación en sus máquinas de manera temprana, lo que puede prevenir fallas costosas y tiempos de inactividad no planificados. La norma aborda aspectos como la selección de parámetros de monitoreo, la recopilación de datos, el análisis de datos, el diagnóstico y pronóstico, las decisiones de intervención de mantenimiento, la integración con la gestión de activos, la documentación y la comunicación de resultados. Sin embargo, su aplicación específica puede variar según la industria y las necesidades de cada organización.

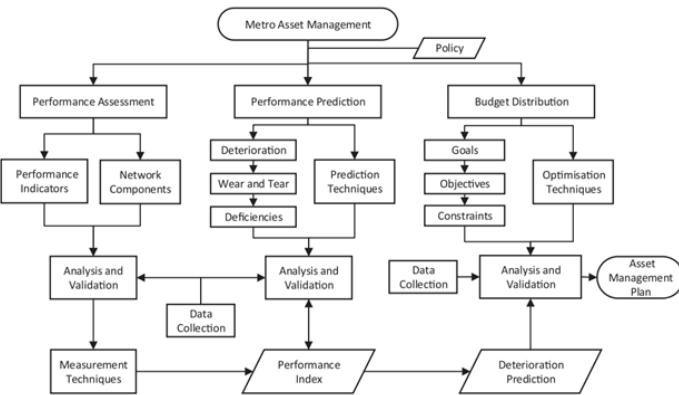
Infraestructura inteligente: Monitoreo remoto de condiciones centrado en el usuario

El libro "Infraestructura inteligente: Monitoreo remoto de condiciones centrado en el usuario" [79] destaca la importancia de la infraestructura inteligente, que emplea tecnologías como sensores, comunicaciones inalámbricas, big data y aprendizaje automático para recopilar y analizar datos sobre el estado de equipos y activos industriales. Estas tecnologías ofrecen inteligencia sobre el estado actual y futuro de los activos, apoyando a operadores y gerentes de mantenimiento en la toma de decisiones. El libro aborda los desafíos asociados con el uso de estas tecnologías, particularmente en términos de factores humanos, como la gestión de alarmas, la interpretación de datos y la colaboración con la automatización. Proporciona un marco para comprender y abordar estos desafíos de manera sistemática, con el objetivo de mejorar la efectividad de los operadores y las organizaciones en su conjunto.

Gestión de desempeño de activos ferroviarios

La gestión de desempeño de activos ferroviarios se refiere a las prácticas y herramientas utilizadas para mantener, mejorar y optimizar la operación de infraestructura y material rodante en el sector ferroviario. Con el avance de la tecnología y la digitalización, estas prácticas han evolucionado hacia enfoques más predictivos y basados en la condición real de los activos. Esto implica identificar indicadores de rendimiento adecuados, evaluar regularmente los activos y desarrollar modelos de predicción para anticipar su rendimiento. También se debe diseñar un sistema de toma de decisiones para planificar tareas de mantenimiento, rehabilitación y reemplazo de los activos, teniendo en cuenta factores como la complejidad del sistema, el presupuesto, los cambios en la demanda y el deterioro de los activos. En el caso de sistemas de metro, se utiliza una lógica jerárquica para evaluar el rendimiento desde la perspectiva de la agencia y el usuario, considerando los diferentes componentes del sistema y utilizando técnicas como AHP, ANP y TOPSIS para integrar el rendimiento de manera efectiva [40].

Figura 40. Marco para gestión de activos de sistemas metro.



Fuente: Adaptado de “Figure 2. Developed framework for metro asset management” [Diagrama], de Mohammadi, A. Amador-Jimenez, L. & Nasiri, F. (2019). Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2018.1470119>.

Sauni, M., Luomala, H., Kolisoja, P., & Vaismaa, K [41], han presentado un marco para el desarrollo de análisis de deterioro de la geometría de la vía (TGDA) mediante un Modelo de Madurez de Capacidades (CMM) aplicado en la red ferroviaria de Finlandia. El CMM consta de cuatro niveles que van desde garantizar la seguridad vial hasta optimizar la geometría de la vía, permitiendo la medición y monitoreo de áreas con desviaciones críticas que requieren mantenimiento. Además, se llevan a cabo entrevistas con expertos en mantenimiento, inspección y gestión de activos para evaluar el nivel de madurez. Este enfoque ha mejorado la eficiencia del monitoreo de condiciones, reduciendo riesgos y costos de mantenimiento, y facilitando la comunicación y la implementación de mejoras.

También Shubs Jr, A., Seaton, J. D., & Roenspies, D. M [42] han propuesto y patentado un método para gestionar activos ferroviarios, centrándose en su disponibilidad y confiabilidad. Este enfoque implica la recopilación de datos de sensores en vehículos ferroviarios, que reflejan métricas operativas y de mantenimiento. También se recopilan datos predictivos de una fuente de memoria. Utilizando simulaciones basadas en estos datos, se evalúan los posibles beneficios de realizar modificaciones en aspectos operativos o de mantenimiento. La función de los sensores es generar señales en tiempo real sobre características operativas o de mantenimiento de activos ferroviarios. El método busca identificar mejoras anticipadas en áreas como el intervalo de mantenimiento, la disponibilidad del vehículo y la probabilidad de éxito en tareas, y emite instrucciones de control basadas en estas mejoras potenciales.

La patente asignada a SHANGHAI CHANGHE INFORMATION TECHNOLOGY Co Ltd [43] propone un método avanzado para gestionar eficientemente equipos en redes de metro con el objetivo de reducir costos. Este sistema abarca una amplia gama de equipos utilizados en el metro, desde vehículos hasta sistemas eléctricos y comunicaciones. Utiliza una base de datos central para almacenar registros de operación y mantenimiento, historiales de fallas, datos de monitoreo en línea y fuera de línea, así como información sobre el modelo y el fabricante de los activos. Se incorporan modelos matemáticos para diagnóstico y análisis, junto con reglas basadas en la experiencia y estándares de la industria, para automatizar la toma de decisiones en el Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado. Este enfoque busca mejorar la eficiencia en la gestión y el mantenimiento de activos del metro.

En el seminario del ferrocarril urbano de UITP del 2023 [59], se abordaron temas relacionados con la optimización de costos y la gestión de activos ferroviarios en sistemas de metro en Asia. Se destacó cómo la toma de decisiones en la gestión de activos se basa en información clave, normas y sistemas, con ejemplos

concretos de implementaciones exitosas en el metro de Singapur, donde se utilizan sistemas de supervisión de la catenaria para mejorar la productividad, y en el MTR de Hong Kong, que emplea sistemas de mantenimiento inteligente y robótica de inspección para aumentar la eficiencia y confiabilidad de los trenes. Estos casos ejemplifican cómo la gestión efectiva de activos puede mejorar el rendimiento de los sistemas de metro.

La evaluación constante de activos y sistemas de gestión de activos en organizaciones, como sistemas ferroviarios, es esencial para garantizar un rendimiento óptimo. Transformar datos y reportes en información útil requiere la definición de objetivos claros y auditorías regulares, posiblemente complementadas con autoevaluaciones. La calidad de las mediciones de desempeño depende de la recopilación precisa de datos y análisis detallados, y los resultados deben estar alineados con los objetivos para lograr una gestión de activos coherente que impulse la sostenibilidad y mejore el rendimiento de los sistemas y procesos [60].

Norma ISO 22400-1, ISO 22400-2 e ISO 22400-10

En el área de sistemas de automatización e integración, las normas ISO 22400-1 (2014) [61], ISO 22400-2 (2017) [62] e ISO 22400-10 (2018) [63], establecidas por la Institución British Standards, establecen todo el marco de conceptos, definiciones y secuencia operacional para la recolección de datos para la formulación de indicadores clave de rendimiento (KPI por sus siglas en inglés) para la gestión de operaciones de manufactura. Únicamente se menciona la existencia de estas normas, pues no se cuenta con el acceso a ellas para ahondar más.

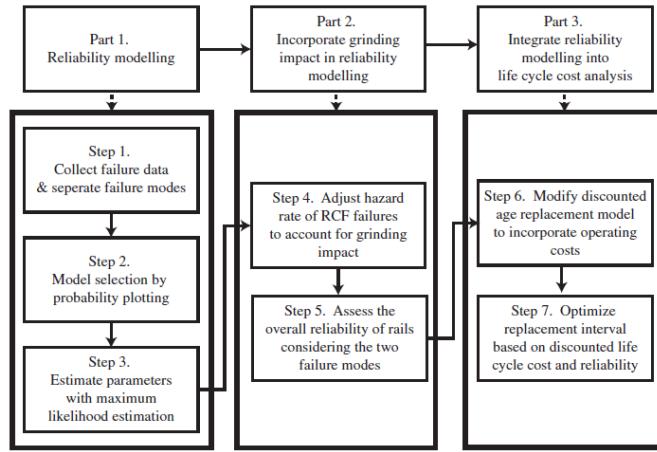
Gestión de costo de ciclo de vida de activos ferroviarios – Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

El análisis del costo de ciclo de vida es una técnica de análisis basada en principios económicos que, como lo indica Shang, van den Boomen, de Man, y Wolfert (2019) [44], busca optimizar los costos de inversión, operación y mantenimiento de los activos al tener en cuenta todos los elementos de costo a lo largo de su ciclo de vida. El LCCA es reconocido como una herramienta valiosa para apoyar la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento, la selección de alternativas de repuesto y el establecimiento de políticas de gestión optimas a la vez que se reduce la huella material de la organización. Debido a la elevada complejidad de los sistemas ferroviarios y la interdependencia de sus activos, la toma de decisiones debe considerar un gran rango de variables para garantizar la seguridad y disponibilidad de los activos de manera sostenible y al menor costo.

Análisis de costes del ciclo de vida basado en la fiabilidad para rieles integrados en pasos a nivel

Shang et al. (2019) desarrollaron un modelo de Análisis de Ciclo de Vida de Costos (LCCA) para activos ferroviarios, específicamente un sistema de fijación de rieles llamado ERS. El modelo integra la confiabilidad, los parámetros financieros y las estrategias de mantenimiento, considerando la degradación de los rieles debido a factores como la corrosión y la fatiga. Se aplicó a un estudio de caso en la red ferroviaria holandesa, y los resultados destacaron la importancia de considerar tanto los costos como la confiabilidad en la toma de decisiones de mantenimiento, así como la necesidad de un enfoque integral para la gestión de activos y la recopilación de datos precisos para evaluar las estrategias de mantenimiento de manera continua. El modelo permitió optimizar las estrategias de mantenimiento y minimizar los costos del ciclo de vida de los rieles.

Figura 41. Diagrama de flujo del modelo LCC basado en confiabilidad.



Fuente: Adaptado de “Figure 5. Flowchart of the reliability-based LCC model.” [Diagrama], de Shang et al (2019). Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/334891000_Reliability-based_life_cycle_costing_analysis_for_embedded_rails_in_level_crossings

La ecuación 10 es el resultado de la investigación, donde EMC es el costo mensual equivalente por sus siglas en inglés. EMC_{in} es el EMC de los costos de inversión inicial, y $EMC_{E(L)}$ es el EMC durante la longitud de ciclo esperado E(L). Esta es una función de coste objetivo que vincula el impacto de la degradación del carril y las variables de decisión de mantenimiento ($t_p, t_{pm}, t_{ui}, t_{vi}$) con LCC. El mínimo de EMC_{total} proporciona un óptimo económico para respaldar la decisión de reemplazo. Este modelo es subsecuentemente aplicado a un estudio de caso de ERS en el Harmelen LC de la red ProRail.

Figura 42. EMC total EMC_{total} .

$$EMC_{total} = EMC_{E(L)} + EMC_{in} \quad (10)$$

Fuente: Adaptado de “Ecuation 10” [Ecuation], de Shang et al (2019). Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/334891000_Reliability-based_life_cycle_costing_analysis_for_embedded_rails_in_level_crossings

Gestión de activos de infraestructura ferroviaria: el análisis del coste de vida de todo el sistema

En una investigación realizada por Rama y Andrews (2016) [45] se presenta un marco de modelado para evaluar el Análisis de Ciclo de Vida de Costos (LCC) de infraestructura de activos múltiples en el contexto ferroviario. Este marco permite considerar las interdependencias entre las decisiones de gestión de múltiples activos desde las perspectivas de costo y rendimiento. Se abordan cuestiones como la definición de la configuración de infraestructura, los factores que influyen en los LCC, las implicaciones de las decisiones en todo el sistema ferroviario y la gestión de la incertidumbre. El modelo de infraestructura se construye jerárquicamente, los modelos de degradación y mantenimiento son estocásticos, y se utiliza la técnica de modelado de redes de Petri (PN) junto con simulaciones Monte Carlo para evaluar el desempeño y los costos a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura.

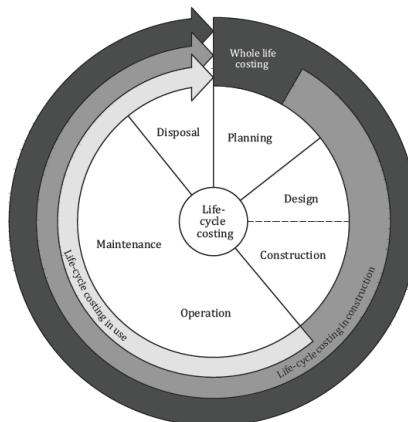
El modelo propuesto fue aplicado a un caso de estudio centrado en una sección de una red ferroviaria en el Reino Unido y tuvo como objetivo evaluar los LCC de diferentes estrategias de intervención para la

renovación de la superestructura. Los resultados del estudio demostraron que los LCC de las diferentes estrategias de intervención varían significativamente, con algunas estrategias resultando en LCC significativamente más bajos que otros. Los resultados también muestran que la elección de la estrategia de intervención depende de una variedad de factores, que incluyen la condición actual de los activos, el volumen de tráfico futuro esperado y el presupuesto disponible. Finalmente se concluyó que el marco propuesto proporciona un enfoque integral para la gestión de activos de infraestructura, lo que permite la evaluación de los efectos de diferentes actividades de intervención en el rendimiento y los costos de todo el sistema ferroviario.

Norma ISO 15686-5

En el área de costeo del ciclo de vida en la planificación de la vida útil de edificios y activos construidos, la Parte 5 de la norma ISO 15686 (2017) [64] establecida por la Institución British Standards, propone estándares internacionales para el costeo del ciclo de vida (LCC) en la industria de la construcción. Esto con el objetivo de proporcionar un marco estandarizado que mejore la toma de decisiones, aumente la transparencia y ofrezca una guía consistente para evaluar costos y desempeño en diferentes etapas de proyectos de construcción. Aunque se enfoca en la construcción, este marco puede adaptarse a diversas industrias. El análisis de LCC se utiliza para cuantificar los costos a lo largo de la vida de un activo y abarca categorías como inversión, diseño, construcción, ocupación y eliminación. Este análisis se utiliza en diferentes etapas del ciclo de vida de un activo construido para evaluar su rendimiento y costo a lo largo del tiempo.

Figura 43. Análisis en diferentes etapas del ciclo de vida



Fuente: Adaptado de “Figure 4 - Analysis at different stages of the life cycle” [Diagrama], de British Standard, (2017). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/61148.html>

Normas ISO 9000, ISO 9001 e ISO 9002

Las normas ISO 9000 (2015) [65], ISO 9001 (2015) [66] e ISO 9002 (2016) [67] establecidas por la Institución British Standards son fundamentales en la industria del transporte público para garantizar la seguridad y satisfacción de los usuarios. Estas normas se centran en sistemas de gestión de calidad (QMS) y proporcionan un marco estandarizado para la mejora de procesos, la toma de decisiones y la transparencia en organizaciones de diversos sectores, no solo en la construcción. Un QMS abarca la identificación de objetivos y la gestión de procesos y recursos para proporcionar valor y satisfacer a las partes interesadas.

La norma ISO 9001 destaca los beneficios de la implementación de un QMS, como la entrega consistente de productos y servicios que cumplen con requisitos legales y del cliente, mejora la satisfacción del cliente y la gestión eficaz de procesos interrelacionados. Además, se enfatiza el enfoque basado en procesos y el pensamiento basado en riesgos para lograr la eficacia y eficiencia en la organización y se describe el ciclo Plan-Do-Check-Act (PDCA) como una herramienta clave para mejorar continuamente el sistema de gestión de calidad.

Sistema de información para el mantenimiento económico de vagones de ferrocarril basado en el costo del ciclo de vida minimizado/optimizado

Park, Lee, An y Han (2003) [68] proponen un sistema de información innovador diseñado para mejorar los procesos de mantenimiento y reparación de vehículos ferroviarios, centrándose en la minimización y optimización del costo del ciclo de vida de los vagones de ferrocarril mediante la recopilación, administración y utilización automáticas de datos de conducción del vehículo. Este sistema aborda la necesidad de una gestión integral de información en la industria ferroviaria, que incluye la falta de integración entre desarrollo de productos, operación/mantenimiento y otros aspectos. El sistema consta de cuatro módulos principales: recopilación de información de conducción, soporte de mantenimiento, sistema de trabajo y gestión de mantenimiento. Estos módulos se interconectan para gestionar eficientemente los recursos, datos y planes relacionados con el mantenimiento y la reparación de vehículos ferroviarios, mejorando así la eficiencia y precisión de estas actividades.

Voestalpine

Voestalpine [69], una empresa líder en sistemas ferroviarios, ha desarrollado tres herramientas de Análisis de Ciclo de Vida de Costos (LCCA) para ayudar a los operadores ferroviarios a evaluar los impactos económicos y ambientales de sus productos y soluciones. Estas herramientas incluyen LCC Rail - Segment para analizar curvas específicas, LCC Turnout para evaluar diferentes componentes de desvío, y LCC Rail - Line que utiliza mediciones de campo para comparar estrategias de grado y mantenimiento en secciones completas de vías. Estas herramientas proporcionan una base sólida para la toma de decisiones en la industria ferroviaria, tanto para el mantenimiento de sistemas existentes como para nuevas inversiones.

Gestión de activos ferroviarios

Los sistemas ferroviarios han jugado un rol muy fundamental en el crecimiento de las industrias y en correcto funcionamiento de diversas sociedades durante siglos. Al cumplir importantes tareas como el transporte público o de carga, es un sector en el cual se invierte considerablemente, por esto se habla de una correcta gestión de sus activos al recibir inversiones de alrededor de veinte billones de euros anuales. Grandes cifras principalmente invertidas por motivos de mantenimiento de vías, infraestructuras y trenes, lo que no se tiene en cuenta es que una porción de esta inversión de mantenimiento y gestión de activos podría ser evitada pasando de un mantenimiento preventivo a uno predictivo, claro está con la tecnología correcta aplicada de una manera eficiente. El foco principal de la gestión de activos ferroviarios es la planificación estratégica, control operacional y mantenimiento continuo de activos tecnológicos y material rodante. Todo esto siendo actividades esenciales para garantizar el cumplimiento de estándares de seguridad tanto de pasajeros como de carga, además de fiabilidad y eficiencia del sistema ferroviario. [46]

Liu, H., Rahman, M., Rahimi, M., Starr, A., Durazo-Cardenas, I., Ruiz-Carcel, C., Ompusunggu, A., Hall, A & Anderson, A [46] desarrollaron el sistema de mantenimiento para activos ferroviarios “Intelligent Innovative Smart Maintenance of Assets by Integrated Technologies 2” (IN2SMART2), el cual es un

proyecto fundado por el grupo europeo Shift2Rail Horizon2020. Este proyecto trata de mejorar substancialmente la gestión de los activos ferroviarios mediante un sistema robótico autónomo, equipado con un sistema de comando y control remoto (C&C) el cual permite una mejor percepción, comunicación, manejo, óptima evasión de riesgos y ejecutor de tareas, todas estas automatizadas. Este sistema está específicamente diseñado para facilitar la operación de un sistema de inspección y reparación robótico autónomo (RIRS) con el propósito de automatizar las tareas de mantenimiento en los rieles de un sistema ferroviario, estas tareas serán determinadas por la base de datos de gestión de activos correspondiente. El sistema se encarga de identificar el trabajo de mantenimiento que se debe llevar a cabo, realizar una inspección precisa del punto de trabajo, hacer las preparaciones necesarias, ejecutar la tarea y hacer una evaluación del trabajo realizado, tras la revisión el robot pasara a una segunda tarea solo con la debida inspección y aprobación de un operario capacitado.

Decisiones basadas en el riesgo para la gestión estratégica de activos:

El artículo “A risk-informed decision support tool for the strategic asset management of railway track infrastructure” de J Rail and Rapid Transit (2022) [70] presenta un marco de trabajo para la gestión estratégica de activos ferroviarios basado en el análisis de riesgos y la toma de decisiones. Este enfoque utiliza simulación Monte Carlo y razonamiento difuso para abordar la incertidumbre y proporcionar predicciones precisas y confiables de las necesidades y costos de mantenimiento en el ciclo de vida de los activos ferroviarios. Se prueba en rutas ferroviarias en el Reino Unido y busca encontrar estándares de mantenimiento económico que satisfagan las necesidades de todas las partes interesadas. Además, se menciona la importancia de un análisis completo del costo de vida útil de los activos ferroviarios (WLCCA) y se presentan ecuaciones para calcular los costos asociados con la construcción, mantenimiento, uso y fin de ciclo de vida de las vías ferroviarias.

Sistema de gestión de activos ferroviarios basado en tecnología Blockchain:

La patente de Wang, Wang, Zhang, Li, Cheng, He, y Zhu (2020) [71] describe un sistema de gestión de activos ferroviarios basado en tecnología blockchain que aborda desafíos como la pérdida de datos, la estabilidad del sistema y la credibilidad de los datos en la gestión de activos ferroviarios. Este sistema utiliza múltiples unidades funcionales que operan como nodos en una red blockchain, incluyendo unidades para el registro de activos, monitoreo, inspección y mantenimiento. Ofrece ventajas como la integridad y seguridad de los datos, la descentralización y redundancia, la detección de fallas en tiempo real, el mantenimiento eficiente y una toma de decisiones mejorada. Además, esta innovación tiene el potencial de transformar la industria ferroviaria y podría inspirar aplicaciones similares en otros sectores, gracias a su enfoque en la eficiencia, transparencia y seguridad de los datos.

Aplicación móvil Trapeze EAM:

Trapeze, una empresa especializada en soluciones de gestión de activos empresariales (EAM) para flotas ferroviarias, ofrece un manual centrado en mejorar la seguridad, reducir costos y optimizar la planificación de recursos para el transporte ferroviario mediante una aplicación móvil basada en la nube [72]. La aplicación rastrea los costos asociados a los activos ferroviarios a lo largo de su vida útil, incluyendo mano de obra, materiales, combustibles y otros gastos, además de llevar un registro de mantenimientos preventivos y correctivos. Los beneficios incluyen una mayor eficiencia en talleres, una mejora en la gestión de inventarios y una extensión de la vida útil de los activos, lo que se traduce en una infraestructura más segura, menos retrasos y una experiencia más agradable para los pasajeros. La implementación de esta

solución también permite la toma de decisiones en tiempo real y la eliminación de procesos manuales a través de informes automáticos y catálogos digitales.

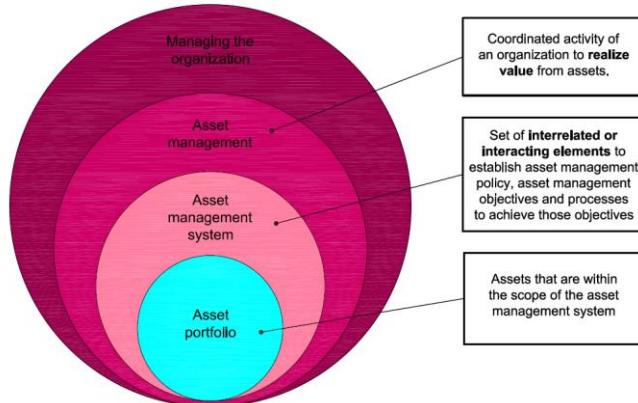
Asset management: The state of the art in Europe from a life cycle perspective

El libro "Asset management: The state of the art in Europe from a life cycle perspective," publicado por Van der Lei, Herder y Wijnia en 2012 [73], analiza el estado actual de la gestión de activos en Europa desde una perspectiva de ciclo de vida. En respuesta a cambios regulatorios y mayor competitividad, se han desarrollado métodos de gestión de activos para mejorar su ciclo de vida, centrándose especialmente en las fases de diseño y operación y mantenimiento. El libro, que consta de 172 páginas y 4 secciones, cubre temas como la integración estratégica de activos de ingeniería inteligente, gestión de activos corporativos, planificación de inversiones flexibles y evaluación del rendimiento de activos, entre otros, con el objetivo de abordar los desafíos actuales en la gestión de activos en Europa.

Norma ISO 55000, ISO 55001 e ISO 55002

Las normas ISO 55000 (2014) [74], ISO 55001 (2014) [75] e ISO 55002 (2018) [76] establecidas por la British Standards Institution son referencia internacional para la gestión de activos. Estas normas describen cómo las organizaciones deben gestionar sus activos para lograr un equilibrio entre costos, riesgo y mantenimiento. Se enfatiza la importancia de considerar factores como la naturaleza de la organización, su contexto operativo, restricciones financieras y expectativas de partes interesadas. La gestión de activos se realiza a través de sistemas de gestión que abarcan la planificación, el liderazgo, el soporte, la operación, la evaluación del desempeño y la mejora continua. Estos sistemas deben ser integrados con otros sistemas de gestión existentes en la organización, lo que puede aumentar la eficiencia y la coordinación interfuncional, reduciendo costos y riesgos.

Figura 44. Relaciones entre términos clave.



Fuente: Adaptado de “Figure 1 - Relationships between key terms” [Diagrama], de British Standard, (2014). Disponible en:
<https://www.iso.org/standard/55088.html>

Norma ISO/IEC TR 20547-1: Tecnología de la información: Big data, Arquitectura de referencia - Parte 1: Marco y proceso de aplicación

La normativa ISO/IEC 20547 [77] tiene como objetivo proporcionar una base efectiva para describir y comunicar las características de los sistemas de Big Data. Estos sistemas manejan grandes cantidades de

datos con diversas características, como volumen, variedad, velocidad y variabilidad, lo que requiere una arquitectura escalable. La serie ISO/IEC 20547 consta de 5 partes que cubren diferentes aspectos de la arquitectura de referencia para Big Data. Esto incluye establecer el marco de referencia, proporcionar ejemplos de casos de uso, detallar la arquitectura en términos de roles y componentes funcionales, abordar la seguridad y privacidad, y describir estándares relevantes. El proceso de aplicación de esta arquitectura implica identificar partes interesadas y preocupaciones, mapear estas preocupaciones a roles y subroles, definir actividades concretas, seleccionar componentes estructurales y validar las preocupaciones relacionadas con los componentes funcionales. En resumen, la normativa ISO/IEC 20547 proporciona una guía integral para el diseño y la implementación efectiva de sistemas de Big Data.

Norma ISO/IEC 24668: Tecnología de la información — Inteligencia artificial — Gestión de procesos marco para el análisis de Big data

La norma ISO/IEC 24668 [78] presenta un esquema de administración de procesos para el uso de análisis de Big Data en diversas actividades de una entidad. Dado el desafío que representan los grandes volúmenes de datos, su diversidad, velocidad y complejidad, esta norma introduce un Modelo de Referencia de Proceso para Big Data (PRM) junto con un Modelo de Evaluación (PAM). Estos modelos se utilizan principalmente para la gestión de procesos, desarrollo de competencias, gestión de datos, análisis y tecnología en organizaciones. La implementación de esta norma busca obtener ventajas competitivas, tomar decisiones más acertadas, mejorar la experiencia del cliente, aumentar las ventas, agilizar respuestas a oportunidades y amenazas, reducir errores y costos, y garantizar la privacidad y el cumplimiento de regulaciones. El PRM se describe en términos de propósitos y resultados de procesos, mientras que el PAM se utiliza para evaluar la calidad del proceso basado en uno o más PRM, empleando una escala de calificación común. Los atributos del proceso se evalúan en función de si son "No logrados", "Parcialmente logrados", "Mayormente logrados" o "Totalmente logrados". En conjunto, estos modelos permiten una gestión más efectiva de los procesos relacionados con Big Data, desde la gestión de datos hasta el desarrollo de análisis y la integración tecnológica.

Norma ISO/IEC/IEEE 12207: Ingeniería de sistemas y software - Procesos de ciclo de vida del software

La norma ISO/IEC/IEEE 12207 [84] es un estándar internacional que establece un marco para los procesos de ciclo de vida del software. Esta es utilizada para definir los procesos y actividades que deben llevarse a cabo en el desarrollo, mantenimiento y gestión del software a lo largo de su ciclo de vida. Es ampliamente reconocida y utilizada en la industria del software pues proporciona un marco sólido para el desarrollo y la gestión de proyectos de software. Ayuda a las organizaciones a estandarizar sus prácticas de desarrollo de software, mejorar la calidad del software y facilitar la comunicación y colaboración entre los equipos de desarrollo y las partes interesadas.

Norma ISO/IEC/IEEE 15288: Ingeniería de sistemas y software - Procesos de ciclo de vida del sistema

La norma ISO/IEC/IEEE 15288 [85] establece un marco común de descripciones de procesos para describir el ciclo de vida de los sistemas creados por humanos. Define un conjunto de procesos y terminología asociada desde el punto de vista de la ingeniería. Estos procesos se pueden aplicar en cualquier nivel de la jerarquía de la estructura de un sistema. Se pueden aplicar conjuntos seleccionados de estos procesos a lo largo del ciclo de vida para gestionar y realizar las etapas del ciclo de vida de un sistema. Esta trata con sistemas creados por el hombre y que pueden configurarse con uno o más de los siguientes elementos del sistema: hardware, software, datos, humanos, procesos (por ejemplo, procesos para brindar servicios a los

usuarios), procedimientos (por ejemplo, instrucciones del operador), instalaciones, materiales y entidades naturales.

Norma ISO/IEC 19770-1: Tecnologías de la información. Gestión de activos de TI. Sistemas de gestión de activos TI. Requisitos

La serie ISO/IEC 19770 proporciona un marco para la gestión eficiente de los activos de software en una organización, lo que incluye la adquisición, implementación, uso y eliminación adecuada de software. La parte 1 ISO/IEC 19770-1 [86], establece un marco general para la gestión de activos de software y proporciona directrices para la implementación de un sistema de gestión de activos de software. Se enfoca en la gestión de la adquisición y el uso de software, incluyendo licencias y activos relacionados.

La gestión de activos de software es especialmente relevante en organizaciones que utilizan una amplia variedad de software con múltiples licencias y proveedores, ya que puede ayudar a mantener un control preciso de los activos de software y garantizar que se utilicen de manera eficiente y conforme a las licencias. La serie ISO/IEC 19770 permite a las organizaciones garantizar que los activos de software se gestionen de manera eficaz y cumplan con los requisitos de licencia. De esta manera se pueden evitar infracciones de licencia, reducir costos innecesarios y mejorar la transparencia en la gestión de activos de software.

Norma ISO/IEC 25000: Ingeniería de sistemas y software. Evaluación y Requisitos de Calidad de Sistemas y Software (SQuaRE). Guía de SQuaRE

La serie ISO/IEC 25000 [87], conocida como SQuaRE (Software Quality Requisitos y Evaluación), se refiere a un conjunto de normas internacionales que establecen un marco para la evaluación de la calidad del software. Estas normas se centran en definir procesos y métricas para evaluar la calidad de los productos de software y proporcionar una base para la comunicación efectiva entre proveedores y clientes sobre la calidad del software.

Norma ISO/IEC/IEEE 29119: Software and systems engineering — Software testing

La serie ISO/IEC/IEEE 29119 [88] es un conjunto de estándares que definen un marco acordado internacionalmente para las pruebas de software. Los conceptos generales y la terminología común utilizados se definen en la Parte 1. Los estándares básicos se basan en un conjunto de procesos de prueba, definidos en la Parte 2, que cubren las pruebas a nivel organizacional, de gestión y de pruebas dinámicas. La documentación de prueba, definida en la Parte 3, se produce mediante la ejecución de los procesos de prueba; por lo tanto, la documentación de prueba describe los resultados de los procesos de prueba. Finalmente, las diferentes técnicas de diseño de pruebas se definen en la Parte 4.

Conclusión

A manera de conclusión, y con base en la información contenida en el estado del arte, se propone una plataforma integradora de servicios digitales para soluciones tecnológicas en sistemas ferroviarios con el objetivo de optimizar la gestión de activos y sus correspondientes estándares de calidad dados por la norma 9000, y objetivos de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS). Esta plataforma permitirá realizar un análisis de costos de ciclo de vida (LCC) a partir de indicadores clave de desempeño (KPIs) para la gestión de activos en correspondencia con la norma ISO 55000. La plataforma permitirá inicialmente realizar solo análisis de costo de ciclo de vida de activos, sin embargo, esto se puede escalar para generar análisis de riesgos y seguridad, RAM, modos y efectos de falla, mantenimiento predictivo, desempeño operativo, impacto ambiental, capacidad y carga, planificación de mantenimiento y reemplazo,

cumplimiento regulatorio, y eficiencia energética, para cada uno de los activos monitoreados con base en cómo se afectan unos a otros, y como afectan a sus correspondientes subsistemas y al sistema metro en general.

Para el análisis de costo de ciclo de vida, se empleará inicialmente la tecnología IoT Insight Rail de SKF para el monitoreo de condición de los rodamientos de bogies. Los datos recolectados por el sensor de vibraciones SKF es transmitido a tiempo real a la aplicación de Insight Rail, la cual convierte estos datos en información valiosa para la toma de decisiones de mantenimiento. Ya que se requiere de la centralización de la información para el desarrollo de la plataforma, se deben crear varias bases de datos para los diferentes datos generados en cada etapa del proceso, y estas bases pasan a ser guardadas en un almacén de datos. Los datos recolectados por el sensor serán almacenados en una base de datos de series temporales como InfluxDB o TimescaleDB especializadas en datos que cambian con el tiempo. La información generada por la aplicación Insight Rail será almacenada en una base de datos NoSQL especializada en grandes volúmenes de datos no estructurados y semiestructurados como MongoDB. En el caso de la plataforma, la información generada sobre la gestión de activos y la planificación del mantenimiento será almacenada en una base de datos relacionales (SQL) como MySQL, y las recomendaciones generadas por la inteligencia artificial se almacenarán en una base de datos de grafos como Nao4j.

Para integrar la plataforma de Insight Rail, y los otros posibles servicios digitales que se vayan a implementar, con la plataforma para la gestión del ciclo de vida de activos, se puede emplear la herramienta Apache Camel. El procesamiento de datos en tiempo real y la gestión de big data en la plataforma puede realizarse con Apache Kafka, Apache Flink, Apache Hadoop, o Apache Spark en cumplimiento con las normas ISO/IEC 24668 e ISO/IEC TR 20547-1. El análisis de costo de ciclo de vida se apoyará en el marco propuesto por la norma ISO 15686-5 y se realizará por medio de un análisis de costo total de propiedad (TCO por sus siglas en inglés) y el método de Monte Carlo basados en un modelo de red de Petri que describa las correlaciones e interacciones entre los subsistemas. Las recomendaciones serán generadas por un modelo de deep learning de redes neuronales de la mano de un algoritmo de optimización basado en un análisis de costo-beneficio (CBA por sus siglas en inglés) y de reemplazo óptimo. El primero permitirá identificar las relaciones complejas entre los datos, y el segundo, determinar la decisión más optima con respecto a estrategias y planificación del mantenimiento o reemplazo de activos, con base en objetivos, criterios y parámetros establecidos por el usuario. Para la infraestructura y despliegue del modelo se pueden aprovechar los servicios en la nube de Amazon Web Services (AWS), Google Cloud Platform (GCP) o Microsoft Azure.

6. ANÁLISIS DE OBJETIVOS

Tabla 6. Árbol de objetivos.

Efectos indirectos <ul style="list-style-type: none"> 1.1 Eliminar tareas redundantes en los procesos de mantenimiento 1.2 Aumentar la productividad del personal 1.3 Minimizar la relación costo/beneficio 	<ul style="list-style-type: none"> 2.1 Mejorar la reputación de la organización 2.2 Maximizar el impacto positivo del servicio 2.3 Mejora en el aprovechamiento del tiempo y recursos 2.4 Cimentar el sistema como el referente para demás organizaciones 	<ul style="list-style-type: none"> 3.1 Minimizar la huella material y el consumo de repuestos 3.2 Prolongar el periodo útil de los activos 3.3 Maximizar el aprovechamiento del ciclo de vida de los activos 	<ul style="list-style-type: none"> 4.1 Incrementar la confianza en el servicio de los usuarios 4.2 Transportar una mayor cantidad de usuarios/día 4.3 Minimizar los incidentes e interrupciones en el servicio 	<ul style="list-style-type: none"> 5.1 Maximizar las ganancias por material rodante 5.2 Prolongar los períodos de funcionamiento interrumpido 5.3 Disminuir la presión sobre los activos y el personal 	<ul style="list-style-type: none"> 6.1 Minimizar los costos de consumo energético 6.2 Reducir la huella de carbono 6.3 Aportar a los objetivos de cuidado medioambiental 	<ul style="list-style-type: none"> 7.1 Aumentar en el aprovechamiento de los activos 7.2 Incrementar la calidad y eficiencia en el servicio 	<ul style="list-style-type: none"> 8.1 Potenciar la innovación tecnológica 8.2 Aumentar la actividad económica 8.3 Reducir problemas de compatibilidad a largo plazo 8.4 Eliminar las barreras en la implementación de soluciones tecnológicas
Fines directos <ul style="list-style-type: none"> 1. Aumentar la productividad operacional del sistema. 2. Aumentar la competitividad de la empresa. 3. Reducir el costo de ciclo de vida de los activos. 4. Incrementar la seguridad y satisfacción del usuario. 5. Maximizar la disponibilidad de los activos. 6. Mejorar la eficiencia energética de la operación y mantenimiento. 7. Optimizar el desempeño funcional del sistema. 8. Favorecer la industrialización sostenible. 							
Objetivo Central <p>Aumentar la productividad en sistemas ferroviarios gracias a la adecuada gestión de activos por medio de la centralización de los subsistemas.</p>							
Medios directos <ul style="list-style-type: none"> 1. Implementar sistemas de gestión de activos para subsistemas centralizados. 2. Potenciar las TICs y los recursos humanos. 3. Establecer prácticas de monitoreo de condición y mantenimiento predictivo. 4. Mejorar los procesos operacionales y de mantenimiento. 5. Planificar períodos de mantenimiento con base en la condición de activos. 6. Adoptar tecnologías de ahorro de energía y disminución del consumo. 7. Centralizar los subsistemas para la supervisión y control del rendimiento general. 8. Incrementar la inversión en la actualización y estandarización de las TICs. 							
Medios indirectos <ul style="list-style-type: none"> 1.1 Aumentar la inversión en tecnologías integrables 1.2 Centralizar los subsistemas bajo una misma plataforma de gestión 1.3 Establecer normas y protocolos de interoperabilidad 1.4 Facilitar la coordinación y comunicación efectiva 2.1 Adaptar los softwares para su compatibilidad informática 2.2 Actualizar las soluciones tecnológicas implementadas 2.3 Capacitar al personal en las nuevas soluciones tecnológicas 3.1 Adoptar tecnologías de monitoreo de condición 3.2 Establecer indicadores de desempeño relevantes 3.3 Mejorar la gestión y almacenamiento de la información 4.1 Implantar sistemas de gestión de calidad de activos y servicios 4.2 Planificar horarios y rutas con base en la disponibilidad del material rodante 4.3 Minimizar períodos de inactividad no planificada 5.1 Reconocer los períodos óptimos para la realización de mantenimiento 5.2 Determinar las estrategias de mantenimiento y adquisición de repuestos adecuadas 6.1 Aumentar la inversión en tecnologías de ahorro de energía y disminución del consumo 6.2 Capacitar al personal en el uso de las tecnologías 6.3 Optimizar el consumo energético con base en la demanda 7.1 Implementar un sistema de almacenamiento, flujo y gestión de la información 7.2 Identificar métricas para la evaluación del rendimiento de los activos 7.3 Instaurar protocolos de toma de decisiones informadas 8.1 Instruir a la organización en los beneficios de la gestión tecnológica 8.2 Establecer políticas para la actualización e integración de soluciones tecnológicas 							
Acciones <ul style="list-style-type: none"> 1.1 Evaluar la inversión en tecnologías integrables disponibles en el mercado 1.2 Desarrollar una plataforma para la gestión de los activos bajo un sistema centralizado 1.3 Elaborar la documentación requerida para las normas y protocolos de interoperabilidad 1.4 Establecer sistemas y estrategias para la comunicación efectiva 2.1 Programar procesos que permitan la compatibilidad informática 2.2 Aplicar actualizaciones en software y hardware a soluciones tecnológicas anticuadas 2.3 Formar al personal en la adopción y utilización de soluciones tecnológicas 3.1. Evaluar la inversión en tecnologías de monitoreo de condición disponibles en el mercado 3.2. Analizar las condiciones operativas de los activos para determinar KPIs coherentes 3.3. Adaptar infraestructura telemática eficiente 4.1. Adoptar procesos y estrategias de inspección y control de calidad 4.2. Evaluar la disponibilidad del material rodante para establecer rutas y horarios óptimos 4.3. Instaurar procedimientos rigurosos de control de disponibilidad de activos 5.1. Registrar la información referente a la condición e historia de mantenimiento de los activos 5.2. Elaborar la documentación para los procesos de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo 6.1. Evaluar la inversión en tecnologías de ahorro de energía disponibles en el mercado 6.2. Formar al personal en el uso de las tecnologías de eficiencia energética 6.3. Elaborar la documentación para la explotación con base en la demanda y objetivos sostenibles 7.1. Adecuar y desarrollar hardware y software para el almacenamiento, flujo y gestión de la información 7.2. Elaborar la documentación donde se definen los KPIs para la evaluación del desempeño de activos 7.3. Elaborar la documentación para las alternativas de gestión de activos 8.1. Formar al personal administrativo en las ventajas de la gestión tecnológica 8.2. Elaborar la documentación para las políticas de actualización e integración de soluciones tecnológicas 							

8. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Alternativa 1: Optimización Tecnológica

- 8.1 Educar sobre los beneficios de la gestión tecnológica
- 2.1 Adaptar los softwares para que sean compatibles.
- 1.2 Implementar plataforma para gestión de subsistemas centralizados.
- 1.1 Impulsar la asignación de fondos para tecnologías integrables.
- 1.3 Establecer normas y protocolos de interoperabilidad.
- 6.3 Establecer políticas para la explotación basadas en la demanda y objetivos sostenibles.
- 7.3 Adoptar protocolos para la toma de decisiones en la gestión de activos.
- 5.2 Desarrollar estrategias de planificación para el mantenimiento.
- 6.2 y 2.3 Capacitar al personal frente al manejo de las nuevas tecnologías.

Esta alternativa se centrará en la optimización tecnológica para lograr una gestión más eficiente de los activos ferroviarios. En primer lugar, se instruirá a la empresa en los beneficios de la gestión tecnológica para posteriormente, centralizar el flujo de información proveniente de los diferentes subsistemas y adaptar sus softwares para garantizar la compatibilidad y correcta integración a la plataforma de gestión tecnológica desarrollada como producto principal. Simultáneamente, se impulsará la asignación de fondos para el desarrollo y adquisición de tecnologías unificadas para el monitoreo y la analítica de datos. Además, se establecerán normas y protocolos de interoperabilidad para garantizar una comunicación fluida entre los sistemas, y políticas de sostenibilidad para la gestión del ciclo de vida y el consumo energético. Paralelamente, se llevará a cabo un monitoreo de condición de los activos para su adecuada gestión y mantenimiento, a la vez que se implementan estrategias de planificación para suplir la demanda, y responder adecuadamente a eventos recurrentes e imprevistos. Finalmente, se establecerán protocolos para la formación continua del personal, asegurando que todas las partes interesadas estén alineadas y capacitadas en las nuevas herramientas y procesos.

Alternativa 2: Eficiencia Energética

1. Implementar servicio integrado para subsistemas centralizados.
2. Aplicar plataformas de tecnología de la información integrables.
3. Diseñar y aplicar sistemas de gestión de energía.
4. Adoptar estrategias para condiciones climáticas extremas.
5. Establecer normas y protocolos de interoperabilidad.
6. Establecer protocolos de funcionamiento según demanda energética.
7. Revisar y optimizar los procesos de mantenimiento.
8. Incrementar la inversión en actualización y estandarización de las TIC.

La alternativa de eficiencia energética se centrará en reducir el consumo de energía y mejorar la sostenibilidad en la gestión de activos ferroviarios. En primer lugar, se implementará un servicio integrado para subsistemas centralizados, seguido por la aplicación de plataformas de tecnología de la información integrables. Posteriormente, se diseñarán y aplicarán sistemas de gestión de energía que permitan un monitoreo y regulación eficiente del consumo. Simultáneamente, se adoptarán estrategias para condiciones climáticas extremas, garantizando la operatividad en diversos entornos. Además, se establecerán normas y protocolos de interoperabilidad para asegurar la comunicación entre sistemas. Finalmente, se revisarán y optimizarán los procesos de mantenimiento para reducir tareas innecesarias y garantizar una gestión eficiente de los recursos.

Alternativa 3: Capacitación y Comunicación

1. Implementar servicio integrado para subsistemas centralizados.
2. Facilitar la coordinación y comunicación efectivas por medio de sistema de comunicación entre personal de los subsistemas.
3. Diseñar y ofrecer programas de capacitación continua.
4. Potenciar la formación en tecnologías de la información.
5. Realizar evaluaciones periódicas de infraestructura para adaptación.
6. Implementar un sistema de comunicación proactivo con usuarios.
7. Mejorar el manejo de tecnologías actuales.
8. Mejorar los sistemas de gestión y almacenamiento de información.

Esta alternativa se enfocará en la capacitación y comunicación efectiva para optimizar la gestión de activos ferroviarios. En primer lugar, se implementará un servicio integrado para subsistemas centralizados, asegurando una base sólida. Luego, se facilitará la coordinación y comunicación efectivas entre equipos y departamentos mediante la implementación de mecanismos de colaboración. Simultáneamente, se diseñarán y ofrecerán programas de capacitación continua para los empleados, potenciando sus habilidades en gestión de activos y tecnologías de la información. Además, se potenciará la formación en tecnologías de la información para asegurar el manejo efectivo de las herramientas tecnológicas disponibles. Paralelamente, se realizarán evaluaciones periódicas de la infraestructura para su adaptación y se implementará un sistema de comunicación proactivo con los usuarios para mantenerlos informados sobre cambios. Finalmente, se mejorará el manejo de las tecnologías actuales, garantizando un uso eficiente.

Alternativa 4: Selección y Optimización de indicadores

1. Implementar servicio integrado para subsistemas centralizados.
2. Aplicar servicios de monitoreo de condición y analítica de datos.
3. Seleccionar correctamente los indicadores de rendimiento.
4. Facilitar la identificación de causas de falla.
5. Revisar y optimizar los procesos de mantenimiento.
6. Establecer normas y protocolos de interoperabilidad.
7. Mejorar la coherencia de los indicadores.
8. Realizar evaluaciones periódicas de infraestructura para adaptación.
9. Incrementar la inversión en actualización y estandarización de las TIC.

La alternativa de selección y optimización de indicadores se enfocará en el uso eficiente de métricas para mejorar la gestión de activos ferroviarios. En primer lugar, se implementará un servicio integrado para subsistemas centralizados y sistemas de monitoreo y análisis de métricas para la recolección y estudio de la información. Luego, se seleccionarán correctamente los indicadores de rendimiento que sean coherentes

con los objetivos específicos. Simultáneamente, se facilitará la identificación de causas de falla mediante la implementación de métodos de análisis y auditorías regulares. Además, se revisarán y optimizarán los procesos de mantenimiento para garantizar una gestión eficiente. Paralelamente, se establecerán normas y protocolos de interoperabilidad para asegurar la comunicación efectiva entre sistemas. Finalmente, se optimizarán los sistemas de gestión y almacenamiento de información para un acceso rápido y confiable.

Análisis de alternativas:

Alternativa 1: Optimización Tecnológica

- **Viabilidad Financiera y Económica:** Si bien la inversión inicial podría ser alta, la reducción de costos operativos, el aumento de la eficiencia, y la prolongación del ciclo de vida de activos, podrían generar un retorno financiero positivo a lo largo del tiempo.
- **Viabilidad Técnica:** Adoptando tecnologías comprobadas y aprovechando las metodologías modernas de gestión, el proyecto se alinea con los estándares actuales de la industria, garantizando su viabilidad técnica.
- **Habilidad para Mejorar y Mantener Recursos:** La propuesta facilitará una gestión más proactiva y eficiente de los recursos, extendiendo su vida útil y optimizando su utilización a través de monitoreo y diagnósticos en tiempo real.
- **Sostenibilidad:** Si se establecen procesos adecuados para el mantenimiento y la actualización, la sostenibilidad a largo plazo es posible.
- **Fortalecimiento Institucional y Capacidad Gerencial:** Las herramientas y capacidades adquiridas fortalecerán la gestión institucional, promoviendo decisiones basadas en datos y mejorando la operativa general.
- **Impacto Ambiental:** La optimización tecnológica podría llevar a una mejor gestión de recursos y reducción del impacto ambiental en términos de consumo de energía y recursos. Igualmente, la incorporación de prácticas ecológicamente responsables y la promoción de la eficiencia energética aseguran un enfoque sostenible.
- **Aceptación por Parte de los Beneficiarios:** Las mejoras operativas y en la calidad del servicio, el aumento en la eficiencia, y el enfoque en la sostenibilidad serán percibidos positivamente por los usuarios y beneficiarios.
- **Compatibilidad con Prioridades del Sector:** El proyecto se alinea perfectamente con las prioridades del sector transporte, que busca continuamente mejorar la eficiencia, sostenibilidad y calidad del servicio por medio de la integración y optimización tecnológica.

Alternativa 2: Eficiencia Energética

- **Viabilidad Financiera y Económica:** Los ahorros en costos operativos y energéticos a largo plazo podrían proporcionar un retorno financiero positivo.

- **Viabilidad Técnica:** Las tecnologías de gestión de energía y eficiencia son técnicamente viables y ampliamente disponibles.
- **Habilidad para Mejorar y Mantener Recursos:** Se requerirá personal capacitado para la operación y mantenimiento de sistemas de gestión de energía y tecnologías eficientes.
- **Sostenibilidad:** Si se mantienen prácticas adecuadas de gestión de energía, la sostenibilidad a largo plazo es alcanzable.
- **Fortalecimiento Institucional y Capacidad Gerencial:** La implementación podría fortalecer la capacidad técnica en eficiencia energética y tecnologías ambientales.
- **Impacto Ambiental:** La reducción del consumo de energía y la mejora de la sostenibilidad pueden tener un impacto positivo en el medio ambiente.
- **Aceptación por Parte de los Beneficiarios:** Los beneficios tangibles de ahorro de energía y costos podrían aumentar la aceptación entre los usuarios.
- **Compatibilidad con Prioridades del Sector:** La eficiencia energética es una prioridad en términos de sostenibilidad y reducción de costos en muchos sectores.

Alternativa 3: Capacitación y Comunicación

- **Viabilidad Financiera y Económica:** Los costos de los programas de capacitación y comunicación pueden ser manejables en comparación con los beneficios de un sistema eficiente de flujo de información entre subsistemas, y personal apto.
- **Viabilidad Técnica:** La implementación de programas de capacitación y comunicación es técnica y operativamente posible.
- **Habilidad para Mejorar y Mantener Recursos:** Se requerirá un equipo capacitado para diseñar, implementar y gestionar los programas de capacitación y comunicación.
- **Sostenibilidad:** Si se establecen mecanismos para la actualización y mejora continua, la sostenibilidad es factible.
- **Fortalecimiento Institucional y Capacidad Gerencial:** Esta alternativa puede fortalecer la capacidad de comunicación y coordinación, así como la gestión de activos.
- **Impacto Ambiental:** Los impactos ambientales son indirectos, pero una comunicación efectiva puede fomentar prácticas más sostenibles.
- **Aceptación por Parte de los Beneficiarios:** Una comunicación más eficaz y programas de capacitación pueden mejorar la satisfacción de los usuarios.
- **Compatibilidad con Prioridades del Sector:** La mejora en la coordinación y comunicación es una prioridad en muchos sectores para una gestión eficiente.

Alternativa 4: Selección y Optimización de indicadores

- **Viabilidad Financiera y Económica:** Los costos pueden ser manejables en comparación con los beneficios de una mejor toma de decisiones basada en datos.
- **Viabilidad Técnica:** La implementación de sistemas de medición y análisis de fallas es técnicamente posible.
- **Habilidad para Mejorar y Mantener Recursos:** Se requerirá personal capacitado en análisis de datos y gestión de indicadores.
- **Sostenibilidad:** Con un enfoque en la mejora continua y la actualización de indicadores, la sostenibilidad es alcanzable.
- **Fortalecimiento Institucional y Capacidad Gerencial:** Esta alternativa puede fortalecer la capacidad de análisis y toma de decisiones basada en datos.
- **Impacto Ambiental:** La optimización de indicadores puede contribuir indirectamente a prácticas más sostenibles.
- **Aceptación por Parte de los Beneficiarios:** Una mejora en la toma de decisiones y la eficiencia puede aumentar la aceptación por parte de los usuarios.
- **Compatibilidad con Prioridades del Sector:** La toma de decisiones basada en datos es una prioridad en muchos sectores para la mejora de la gestión.

Análisis técnico de la alternativa seleccionada

Alternativa Seleccionada: Optimización Tecnológica

La "Alternativa 1: Optimización Tecnológica" ha sido seleccionada sobre todas las demás opciones debido a su alineación más sólida con los objetivos centrales y su capacidad para abordar de manera efectiva los diversos aspectos clave del objetivo central. Las medidas que la alternativa implementa están diseñadas para lograr la centralización de subsistemas y la consecuente compatibilidad informática, abordando directamente los medios directos e indirectos planteados en el árbol de objetivos. Igualmente, esta engloba todas las demás alternativas, pues, en su enfoque de optimizar la gestión de activos, la eficiencia, coordinación, comunicación, planificación y gestión de riesgos se ven significativamente mejoradas.

Esta alternativa se destaca como la opción primordial debido a su enfoque holístico que no solo atiende a las demandas actuales, sino que también anticipa los desafíos futuros. Primero, su énfasis en la tecnología garantiza que el sistema ferroviario esté alineado con las últimas innovaciones, lo que se traduce en una operación más eficiente y en una adaptabilidad frente a cambios rápidos en el sector. Esta adaptabilidad tecnológica, junto con la formación continua, garantiza que tanto el personal como el sistema estén en constante evolución y mejora.

La implementación de tecnologías unificadas y plataformas integrables tiene el potencial de mejorar la comunicación y coordinación entre los subsistemas centralizados, además de permitir una gestión más eficiente de los activos ferroviarios. Aunque podría requerir una inversión inicial significativa, la reducción

de costos operativos a largo plazo y la mejora en la calidad del servicio podrían proporcionar un retorno financiero positivo y una mayor satisfacción de los usuarios.

Además, su compromiso con la sostenibilidad no es solo un beneficio ambiental, sino también económico. En una era donde la sostenibilidad es un factor decisivo para muchos consumidores y partes interesadas, esta propuesta coloca al sistema ferroviario en una posición favorable, tanto en términos de imagen como de cumplimiento regulatorio. Las prácticas ecológicamente responsables, la eficiencia energética, y el consumo responsable de recursos pueden generar ahorros significativos a largo plazo, reduciendo costos operativos.

El enfoque en la comunicación y la retroalimentación con los beneficiarios garantiza que sus necesidades y preocupaciones sean atendidas, aumentando la aceptación y satisfacción del usuario. Este componente de feedback es esencial para mantener la relevancia, competitividad y eficacia del sistema a lo largo del tiempo.

La alineación con las prioridades del sector transporte asegura que esta propuesta no solo satisface las demandas actuales, sino que también está preparada para crecer y adaptarse a las necesidades futuras del sector. En su totalidad, esta alternativa representa una inversión en el futuro, consolidando la posición del sistema ferroviario como líder en eficiencia, innovación y sostenibilidad. Por todas estas razones, es indudablemente la mejor alternativa para adoptar.

Por otra parte, esta alternativa presenta marcadas ventajas sobre las demás opciones. Algunas de ellas se muestran a continuación:

- **Eficiencia Energética:** A diferencia de la "Alternativa 1", la "Eficiencia Energética" no aborda directamente la centralización de subsistemas y la compatibilidad informática. La "Alternativa 1" no solo optimiza el consumo de energía, sino que también busca la integración tecnológica y la coherencia en la gestión de activos.
- **Capacitación y Comunicación:** Mientras que la "Capacitación y Comunicación" se enfoca en el desarrollo de habilidades y la colaboración, la "Alternativa 1" va más allá al abordar la necesidad de tecnologías unificadas y plataformas integrables para garantizar la comunicación efectiva entre subsistemas y la coordinación.
- **Selección y Optimización de Indicadores:** A pesar de su valor en la toma de decisiones, la "Selección y Optimización de Indicadores" no resuelve la necesidad de integración tecnológica y coordinación. La "Alternativa 1" se asegura de que los indicadores de rendimiento se elijan adecuadamente como parte de una estrategia más amplia.

Alternativas No Seleccionadas:

Eficiencia Energética:

Esta alternativa se centra en la implementación de estrategias para reducir el consumo de energía y optimizar los recursos. Aunque puede tener un impacto positivo en la sostenibilidad y los costos operativos a largo plazo, no aborda directamente la necesidad de centralización de subsistemas y la compatibilidad informática. Además, no considera todas las áreas clave del objetivo central, como la mejora de la coordinación y comunicación entre subsistemas.

Capacitación y Comunicación:

Aunque la capacitación y la comunicación son aspectos cruciales para el éxito de cualquier proyecto, esta alternativa se centra principalmente en el desarrollo de habilidades del personal y la promoción de la colaboración. Si bien esto podría mejorar la eficiencia en la gestión de activos en cierta medida, no aborda directamente la centralización de subsistemas ni la necesidad de tecnologías unificadas para garantizar la compatibilidad informática. Además, carece de medidas concretas para la adopción de tecnologías modernas de ahorro de energía y la inversión en actualización de TIC.

Selección y Optimización de Indicadores:

La optimización de indicadores es importante para medir el rendimiento y la eficacia de la gestión de activos. Sin embargo, esta alternativa se enfoca principalmente en la recopilación y análisis de datos, sin abordar la necesidad de centralización de subsistemas ni la compatibilidad informática. Aunque es valiosa para el seguimiento y la toma de decisiones informadas, no resuelve la falta de integración tecnológica y coordinación entre los subsistemas.

9. OBJETIVOS

6.1.OBJETIVO GENERAL

Implementar una plataforma de gestión tecnológica en la nube utilizando analítica de datos para el aumento de la productividad de sistemas ferroviarios.

6.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Objetivo específico 1 (OE1):** Estructurar el proceso de gestión de activos con base en las normativas de la serie ISO 55000.
- **Objetivo específico 2 (OE2):** Programar los procesos de ciclo de vida del sistema y software para el proceso de gestión de activos bajo la norma ISO/IEC/IEEE 12207 e ISO/IEC/IEEE 15288.
- **Objetivo específico 3 (OE3):** Integrar los activos digitales para la toma de decisiones y rediseño del plan de gestión de activos con base en la norma ISO/IEC 19770.
- **Objetivo específico 4 (OE4):** Implementar la plataforma en el sistema Metro haciendo uso de la tecnología SKF Insight Rail.
- **Objetivo específico 5 (OE5):** Registrar la plataforma ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor y realizar los programas de capacitación, sensibilización, difusión y feedback.

10. ESTRUCTURA ANALÍTICA DEL PROYECTO

Fines directos:

1. Aumentar la productividad operacional del sistema.
2. Aumentar la competitividad de la empresa.
3. Reducir el costo de ciclo de vida de los activos.
4. Maximizar la disponibilidad de los activos
5. Mejorar la eficiencia energética de la operación y mantenimiento.

Objetivo central:

Aumentar la productividad en sistemas ferroviarios gracias a la adecuada gestión de activos por medio de la centralización de los subsistemas.

Objetivo específico 1

Propósito: Estructurar el proceso de gestión de activos con base en las normativas de la serie ISO 55000.

Producto: 2404040 Documentos de investigación.

Actividades:

1. Definir los componentes base del sistema de gestión de activos.
2. Establecer las políticas y estrategias de gestión de activos.
3. Establecer los procesos y métricas de gestión de activos.
4. Establecer los procesos de mejora continua.

Objetivo específico 2

Propósito: Programar los procesos de ciclo de vida del sistema y software para el proceso de gestión de activos bajo la norma ISO/IEC/IEEE 12207 e ISO/IEC/IEEE 15288.

Producto: Software de gestión de activos.

Actividades:

1. Definir los elementos base de la plataforma.
2. Programar los componentes y ciclo de vida de la plataforma.

Objetivo específico 3

Propósito: Integrar los activos digitales para la toma de decisiones y rediseño del plan de gestión de activos con base en la norma ISO/IEC 19770.

Producto: Plataforma de gestión de activos.

Actividades:

1. Planear la integración de los activos digitales a la plataforma.
2. Desarrollar la infraestructura de recopilación y almacenamiento de datos.
3. Integrar los activos digitales a la plataforma.
4. Desarrollar el plan de pruebas en correspondencia con la norma ISO/IEC/IEEE 29119 para verificar su calidad bajo el estándar ISO/IEC 25000.
5. Gestionar la logística y organización de las pruebas.
6. Ejecutar las pruebas.
7. Evaluar el software con base en la norma ISO/IEC 25040.
8. Establecer protocolo de interoperabilidad.

Objetivo específico 4

Propósito: Implementar la plataforma en el sistema metro haciendo uso de la tecnología SKF Insight Rail.

Producto: 3999064 Documentos de investigación.

Actividades:

1. Integrar el activo digital Insight Rail a la plataforma.
2. Realizar pruebas del funcionamiento conjunto de Insight Rail y la plataforma.

Objetivo específico 5

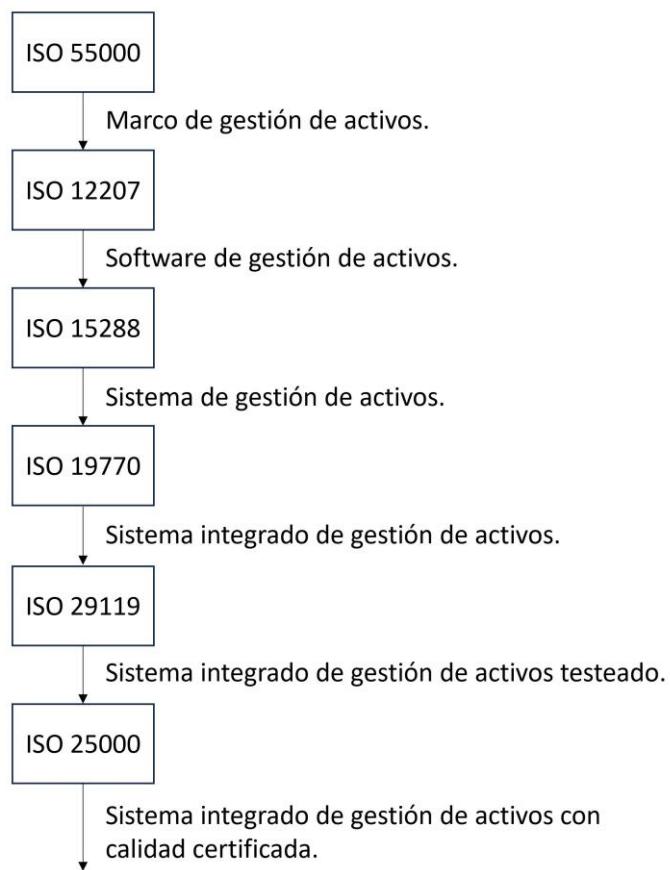
Propósito: Registrar la plataforma ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor y realizar los programas de capacitación, sensibilización, difusión y feedback.

Producto: Registro de software.

Actividades:

1. Registrar la plataforma ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor.
2. Preparar el programa de capacitación, sensibilización, difusión y feedback.
3. Gestionar la logística y organización de los eventos.
4. Ejecutar los eventos.

Figura 45. Diagrama de flujo de relación entre normas.



11. PRODUCTOS ESPERADOS

Tabla 7. Productos esperados.

	Código	Producto	Medido a traves de
Objetivo 1	2404040	Documentos de investigación	Número de documentos
Objetivo 2	NA	Software de gestión de activos	Número de softwares
Objetivo 3	NA	Plataforma de gestión de activos	Número de plataformas
Objetivo 4	3999064	Documentos de investigación	Número de documentos
Objetivo 5	NA	Registro de software	Número de registros

Indicador	Unidad
Documentos de investigación realizados	1
Softwares desarrollados	1
Plataformas implementadas	1
Documentos de investigación realizados	1
Registros de software obtenidos	1

12. METODOLOGÍA

OBJETIVO ESPECÍFICO 1

Estructurar el proceso de gestión de activos con base en las normativas de la serie ISO 55000.

Para este objetivo se definen los requerimientos para el establecimiento, implementación y mantenimiento del sistema de gestión de activos, siguiendo la estructura especificada por la norma ISO 55000.

Actividad 1. Definir los componentes base del sistema de gestión de activos

En esta etapa se definen los componentes base del sistema de gestión de activos para ser usados como los cimientos de las políticas, estrategias, procesos, métricas y mejora continua del sistema de gestión de activos. Aquí se determina el contexto de la organización, el cual incluye los planes, políticas, objetivos y responsables de gestión de activos dentro del Metro de Medellín. Igualmente, se define el portafolio de activos que será abarcado por el proyecto.

- **Responsable:**
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro.
- **Tareas:**
 1. Determinar el contexto de la organización (plan estratégico de gestión de activos (SAMP por sus siglas en inglés), objetivos organizacionales, política de gestión de activos, y responsables de los activos).
 2. Realizar un análisis detallado de los activos existentes en el sistema ferroviario, identificando componentes críticos y no críticos.
 3. Definir el portafolio de activos que serán considerados en la plataforma de gestión de activos.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico del contexto organizacional y la información relevante de cada activo del portafolio establecido, incluyendo su nombre, función, ubicación, estado actual, y demás información relevante.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 2. Establecer las políticas y estrategias de gestión de activos

En esta etapa se establecen las políticas y estrategias de gestión de activos del portafolio definido previamente. Se estudian los riesgos y oportunidades de cada activo y, con base en esto, se determinan estrategias para abordarlos, se instaura una política de gestión de activos, y se implanta un sistema de seguimiento para evaluar el desempeño de ambas propuestas

- **Responsable:**
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro.

- **Tareas:**
 1. Realizar un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas) específico para los activos establecidos, identificando factores internos y externos que puedan influir en la estrategia.
 2. Establecer estrategias para abordar los riesgos y oportunidades, teniendo en cuenta cómo estos pueden cambiar con el tiempo.
 3. Desarrollar la política de gestión de activos con enfoque en seguridad, eficiencia operativa y sostenibilidad para el portafolio de activos.
 4. Definir un sistema de seguimiento y medición para evaluar el desempeño de las políticas y estrategias en el tiempo.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de las estrategias de gestión de riesgos y oportunidades, y la política de gestión de activos.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 3. Establecer los procesos y métricas de gestión de activos

En esta etapa se establecen los procesos y métricas de gestión de activos. Inicialmente se identifican los procesos clave de la gestión de cada activo, para, con base en esto, definir flujos de trabajo que eficienten estos procesos y beneficien el ciclo de vida del activo. Igualmente, se establecen KPIs para la evaluación de esta eficiencia.

- **Responsable:**
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro.
- **Tareas:**
 1. Identificar los procesos clave relacionados con la gestión de activos del portafolio, desde la adquisición hasta la disposición.
 2. Definir flujos de trabajo detallados para cada uno de los procesos identificados, incluyendo las etapas, responsabilidades y entregables asociados.
 3. Definir los procesos de recopilación y almacenamiento de información.
 4. Definir indicadores clave de rendimiento (KPIs) para evaluar la eficiencia y eficacia de los procesos de gestión de activos y los planes de acción correctiva y preventiva definidos en los procesos de mejora continua.
 5. Definir el protocolo de interpretación de métricas de monitoreo de condición (proceso en el que se traduce la información registrada por los sensores y analizada por los activos digitales (softwares) en indicadores de desempeño financieros y operativos).
 6. Definir el protocolo de acción basado en indicadores de monitoreo de condición (proceso en el que se toman los resultados del protocolo de interpretación y se determinan estrategias óptimas y accionables que consideren la información suministrada por los diferentes sistemas de monitoreo en los activos del portafolio). Este protocolo es la base para el sistema de recomendación por machine learning de la plataforma que facilita la toma de decisiones en la generación de los planes de acción correctiva y preventiva de los procesos de mejora continua.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de los procesos y KPIs establecidos.

- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 4. Establecer los procesos de mejora continua

En esta etapa se definen los procesos de mejora continua. Se instauran procesos de seguimiento, como auditorias y entrega de informes, para confirmar el seguimiento de las políticas y estrategias. Asimismo, se establecen planes de acción, tanto correctiva como preventiva, para hacer frente a las problemáticas que surjan en la gestión de activos.

- **Responsable:**
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro.
- **Tareas:**
 1. Definir los procesos de seguimiento (auditorias e informes) para garantizar que los procesos se ejecuten de acuerdo con las políticas y estrategias establecidas.
 2. Establecer planes de acción correctiva y preventiva frente a las no conformidades y los fallos potenciales respectivamente.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de los procesos de seguimiento y los planes de acción establecidos.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

OBJETIVO ESPECÍFICO 2

Programar los procesos de ciclo de vida del sistema y software para el proceso de gestión de activos bajo la norma ISO/IEC/IEEE 12207 e ISO/IEC/IEEE 15288.

Para este objetivo se definen y programan los procesos de ciclo de vida de la plataforma basados en un enfoque de ingeniería de sistemas que permita la integración de elementos como: elementos de hardware, elementos de software, datos, humanos, procesos, servicios, procedimientos, instalaciones, materiales y entidades.

Actividad 1. Definir los elementos base de la plataforma

En esta etapa se definen los elementos base de la plataforma, como los requerimientos, necesidades y objetivos de las partes interesadas, la arquitectura, diseño y componentes de la plataforma, junto a sus correspondientes especificaciones técnicas y requisitos de rendimiento. Considerando lo anterior, se propone un plan de desarrollo de software, precisando la metodología, cronograma y fechas límites.

- **Responsable:**
Ingeniero en ciencias computacionales.
- **Tareas:**
 1. Identificar y analizar los requerimientos de la plataforma con base en las necesidades y objetivos de las partes interesadas.

2. Definir la arquitectura, diseño y componentes de la plataforma considerando las normas ISO/IEC 27000 e ISO/IEC 9000.
 3. Definir las especificaciones técnicas (hardware, software y telemática) y requisitos de rendimiento (capacidad, velocidad, escalabilidad e interoperabilidad) de cada componente.
 4. Definir el plan de desarrollo de software, incluyendo la metodología de desarrollo, el cronograma, y las fechas límite para cada fase del ciclo de vida.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de los requerimientos, arquitectura, diseño y componentes de la plataforma, y plan de desarrollo de software.
 - **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe y el plan de desarrollo de software.

Actividad 2. Programar los componentes y ciclo de vida de la plataforma

En esta etapa se definen y aplican los procesos técnicos para la programación de la plataforma y su ciclo de vida. Estos procesos definen las actividades que permiten que las funciones de la organización y del proyecto optimicen los beneficios y reduzcan los riesgos que surgen de las decisiones y acciones técnicas. Estas actividades permiten que los productos y servicios posean la puntualidad y disponibilidad, la rentabilidad y funcionalidad, confiabilidad, mantenibilidad, producibilidad, usabilidad y otras características de calidad requeridas por la organización adquirente. También permiten que la plataforma se ajuste a las expectativas, perspectivas éticas o requisitos legislados de la sociedad.

- **Responsable:**
Ingeniero en ciencias computacionales.
- **Tareas:**
 1. Realizar el proceso de implementación (programar los componentes según los requerimientos, arquitectura y diseño).
 2. Programar el sistema de recomendación y análisis de datos con modelo de machine learning según la norma ISO/IEC 23053 para el apoyo en la toma de decisiones.
 3. Realizar el proceso de integración según la norma ISO/IEC/IEEE 24748-6 (sintetizar los componentes e integrarlos para formar la plataforma completa).
 4. Realizar el proceso de verificación (realizar pruebas unitarias de los componentes para asegurarse de que funcionen correctamente de manera individual y pruebas de la plataforma para comprobar la correcta interacción entre componentes).
 5. Realizar el proceso de transición al Metro de Medellín (migrar la plataforma de manera ordenada y planificada al entorno de operación previsto, garantizando que esta se mantenga funcional y compatible con los sistemas habilitadores, interconectados e interoperativos en el entorno).
 6. Realizar el proceso de validación (realizar el proceso de testeo que provea evidencia objetiva del cumplimiento de requerimientos de la plataforma cuando es utilizada).
 7. Definir los protocolos de implementación, operación, actualización y mantenimiento de la plataforma.
- **Resultados de la actividad:**
Plataforma digital de gestión de activos e informe técnico de los protocolos de implementación, operación, actualización y mantenimiento.

- **Medio de verificación:**
Acta de entrega de la plataforma y del informe.

OBJETIVO ESPECÍFICO 3

Integrar los activos digitales para la toma de decisiones y rediseño del plan de gestión de activos con base en la norma ISO/IEC 19770.

Para este objetivo se definen los requerimientos para el establecimiento, implementación y mantenimiento del sistema de gestión de activos IT como extensión del sistema de gestión de activos previamente establecido. Siguiendo la estructura especificada por la norma ISO 19770, se planea la integración de los activos digitales, se desarrolla la infraestructura telemática, se integran los activos, y se establece el correspondiente protocolo para su replicabilidad con nuevos activos.

Actividad 1. Planear la integración de los activos digitales a la plataforma

En esta etapa se planifica la integración de los activos digitales a la plataforma. Se identifican los activos digitales que sean parte de las soluciones tecnológicas para el monitoreo de los activos pertenecientes al portafolio. Se evalúa la compatibilidad informática de estos con la plataforma, y se hacen las modificaciones necesarias en caso de incompatibilidad. Finalmente, se define la estructura telemática para el flujo de información, y se define un plan de acción para la integración de cada activo digital a la plataforma.

- **Responsable:**
Administrador tecnológico.
- **Tareas:**
 1. Identificar y registrar todos los activos digitales relevantes que se integrarán en la plataforma, como sensores, dispositivos de monitoreo, sistemas de información, etc. que hagan parte de las soluciones tecnológicas implementadas en los activos del portafolio definido al inicio.
 2. Evaluar la compatibilidad de los activos digitales con la plataforma y determinar si es necesario realizar adaptaciones o mejoras en la plataforma para lograr la integración.
 3. Definir la infraestructura de flujo de información entre los activos digitales y la plataforma.
 4. Establecer un plan de acción para la integración de cada tipo de activo digital determinado previamente, incluyendo las etapas, recursos necesarios y plazos.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de los activos digitales seleccionados y su compatibilidad con la plataforma; informe técnico sobre la infraestructura telemática para el flujo de información; plan de acción para la integración de activos digitales.
- **Medio de Verificación:**
Acta de entrega de los informes.

Actividad 2. Desarrollar la infraestructura de recopilación y almacenamiento de datos.

En esta etapa se desarrolla la infraestructura de recopilación y almacenamiento de datos para permitir el flujo de información entre los activos digitales y la plataforma. En esta etapa se planea, diseña, desarrolla e implementa la infraestructura telemática centralizada. Esta permitirá a la plataforma tener acceso a todos los datos necesarios suministrados por las soluciones tecnológicas implementadas en cada subsistema del sistema ferroviario.

- **Responsable:**
Ingeniero en ciencias computacionales.
- **Tareas:**
 1. Identificar los tipos de datos que se recopilarán de los activos digitales, como datos de sensores, registros de mantenimiento, datos operativos, etc.
 2. Diseñar y desarrollar los procedimientos de recopilación de datos desde los activos digitales.
 3. Definir los requisitos de almacenamiento de datos, incluyendo la capacidad necesaria, la velocidad de acceso y la seguridad de los datos.
 4. Seleccionar y configurar la infraestructura de hardware necesaria, como servidores, sistemas de almacenamiento y equipos de red.
 5. Implementar una solución de almacenamiento de datos escalable que permita gestionar grandes volúmenes de información a medida que se integran más activos digitales.
 6. Desarrollar una arquitectura de base de datos que permita estructurar y organizar los datos de manera eficiente.
 7. Establecer protocolos de seguridad y acceso para proteger los datos almacenados y garantizar su confidencialidad e integridad.
 8. Implementar un sistema de respaldo y recuperación de datos para prevenir la pérdida de información crítica.
- **Resultados de la actividad:**
Infraestructura de recopilación y almacenamiento de datos.
- **Medio de Verificación:**
Acta de entrega de la infraestructura.

Actividad 3. Integrar los activos digitales a la plataforma

En esta etapa se integran los activos digitales a la plataforma, realizando las configuraciones necesarias a la plataforma, preparando planes de contingencia, y realizando pruebas para garantizar el correcto funcionamiento de la plataforma tras la integración de los activos.

- **Responsable:**
Administrador tecnológico.
- **Tareas:**
 1. Realizar las configuraciones y ajustes necesarios para la integración de los activos digitales a la plataforma.
 2. Preparar un plan de contingencia en caso de problemas de interoperabilidad que puedan afectar la operación del sistema ferroviario.
 3. Integrar el activo digital a la plataforma.
 4. Realizar pruebas de interoperabilidad para garantizar que los activos digitales puedan funcionar de manera conjunta con otros componentes de la plataforma.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de la integración de los activos digitales a la plataforma de gestión de activos.
- **Medio de Verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 4. Desarrollar el plan de pruebas en correspondencia con la norma ISO/IEC/IEEE 29119 para verificar su calidad bajo el estándar ISO/IEC 25000.

En esta etapa se realiza la planificación de las pruebas siguiendo los pasos establecidos por la norma ISO/IEC/IEEE 29119, donde se definen los objetivos del plan de pruebas, se identifican los criterios de aceptación, se analizan los requerimientos, se diseñan los casos de prueba, entre otros procesos necesarios para establecer el plan de pruebas y verificar la calidad de la plataforma bajo el estándar ISO/IEC 25000.

- **Responsable:**
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro.
- **Tareas:**
 1. Definir los objetivos específicos del plan de pruebas, incluyendo qué aspectos se van a evaluar y cuáles son los resultados esperados.
 2. Identificar y documentar los criterios de aceptación que deben cumplirse para considerar que las pruebas han sido exitosas.
 3. Analizar los requerimientos del sistema y las funcionalidades de la plataforma de gestión de activos para determinar qué áreas deben ser probadas.
 4. Diseñar casos de prueba detallados que cubran todas las funcionalidades y escenarios relevantes de la plataforma.
 5. Definir los datos de prueba necesarios y la configuración de entorno de pruebas necesario para simular las condiciones de producción.
 6. Definir los planes y estrategias de prueba, los marcos de prueba, y el diseño y ejecución de las pruebas.
 7. Identificar y documentar los riesgos potenciales asociados con las pruebas y desarrollar estrategias de mitigación.
 8. Reservar los recursos necesarios para la realización de las pruebas.
 9. Establecer el plan de pruebas que incluya fechas límite, recursos asignados y responsables de ejecutar las pruebas.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico del plan de pruebas establecido.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 5. Gestionar la logística y organización de las pruebas

En esta etapa se gestiona la logística y organización de las pruebas. Se prepara el equipo de pruebas compuesto por un técnico de mantenimiento, un conductor de Metro y un operador del Puesto Central de Control capacitándolos para apoyar en el desarrollo de las pruebas. Igualmente se prepara el entorno de pruebas con los elementos necesarios, y se gestionan otros aspectos importantes definidos en el plan de pruebas.

- **Responsable:**
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro.

- **Tareas:**
 1. Preparar el equipo de pruebas proporcionando capacitación sobre los casos de prueba y los procedimientos a seguir.
 2. Evaluar la disponibilidad de recursos de hardware y software necesarios para realizar las pruebas de manera efectiva y asegurarse de que estén en funcionamiento.
 3. Gestionar el tiempo de inactividad y los posibles impactos en la producción durante las pruebas, minimizando las interrupciones cuando sea posible.
 4. Preparar el entorno de pruebas con el hardware, software, personal y cualquier otro elemento requerido especificado en el plan de pruebas.
 5. Designar a un responsable de pruebas que supervisará la ejecución de las pruebas y garantizará que se siga el plan establecido.
 6. Comunicar claramente el plan de pruebas, los objetivos y los procedimientos a todo el equipo de pruebas y a las partes interesadas.
 7. Establecer un sistema de seguimiento para registrar el progreso de las pruebas, incluyendo la documentación de los casos de prueba ejecutados y los resultados obtenidos.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de la organización de las pruebas.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 6. Ejecutar las pruebas

En esta etapa se ejecutan las pruebas establecidas en el plan de pruebas.

- **Responsable:**
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro y técnico en TICs. Con apoyo de un conductor de Metro, un técnico de mantenimiento y un operador del Puesto Central de Control asignados por el Metro.
- **Tareas:**
 1. Ejecutar los casos de prueba de acuerdo con el plan de pruebas establecido.
 2. Supervisar el progreso de las pruebas y asegurarse de que se sigan los procedimientos y la secuencia planificada.
 3. Registrar y documentar todos los resultados de las pruebas de manera clara y detallada, incluyendo éxitos y fallos, junto con la información de contexto necesaria.
- **Resultados de la actividad:**
Documentación con los resultados de las pruebas.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega de la documentación.

Actividad 7. Evaluar el software con base en la norma ISO/IEC 25040.

En esta etapa se realiza el proceso de evaluación oficial de la calidad de la plataforma de gestión de activos según la norma ISO/IEC 25040 con base en los resultados obtenidos de las pruebas.

- **Responsable:**
Administrador tecnológico.
- **Tareas:**
 1. Recopilar y organizar la documentación obtenida de las pruebas.
 2. Evaluar los resultados obtenidos.
 3. Compartir la evaluación con las partes interesadas.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de los resultados de la prueba con base en la norma ISO/IEC 25040.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 8. Establecer protocolo de interoperabilidad

En esta etapa se establece el protocolo de interoperabilidad para servir como guía a los usuarios en el proceso de integración de nuevos activos digitales a la plataforma.

- **Responsable:**
Administrador tecnológico.
- **Tareas:**
 1. Documentar los procedimientos, estándares y pruebas de interoperabilidad de manera clara y accesible para el personal técnico y de operaciones para que sea replicable en la integración de nuevos activos digitales.
- **Resultados de la actividad:**
Protocolo de interoperabilidad.
- **Medio de Verificación:**
Acta de entrega del protocolo.

OBJETIVO ESPECÍFICO 4

Implementar la plataforma en el sistema Metro haciendo uso de la tecnología SKF Insight Rail.

Para este objetivo se definen los procesos para la integración de la tecnología de monitoreo SKF Insight Rail con la plataforma, y la posterior implementación de esta en el sistema Metro para evaluar su rendimiento.

Actividad 1. Integrar el activo digital Insight Rail a la plataforma

En esta etapa se integra el software Insight Rail a la plataforma siguiendo el protocolo de interoperabilidad establecido previamente.

- **Responsable:**
Administrador tecnológico.

- **Tareas:**
 1. Integrar el software de Insight Rail a la plataforma según el protocolo de interoperabilidad.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de la integración de Insight Rail a la plataforma.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 2. Realizar pruebas del funcionamiento conjunto de Insight Rail y la plataforma

En esta etapa se realizan pruebas de funcionamiento de la plataforma una vez integrado Insight Rail para comprobar su adecuado funcionamiento conjunto y confirmar su compatibilidad e interoperabilidad.

- **Responsable:**
Ingeniero mecánico especialista en sistemas metro y técnico en TICs. Con apoyo de un conductor de Metro, un técnico de mantenimiento y un operador del Puesto Central de Control asignados por el Metro.
- **Tareas:**
 1. Realizar las pruebas de funcionamiento conjunto de Insight Rail y la plataforma según el protocolo de interoperabilidad.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico de las pruebas de funcionamiento.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

OBJETIVO ESPECÍFICO 5

Registrar la plataforma ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor y realizar los programas de capacitación, sensibilización, difusión y feedback.

Para este objetivo se presenta ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor, según el artículo 5 del Decreto N° 1360 del 23 de junio de 1989, la información requerida para registrar el software. De igual forma, se preparan, gestionan y ejecutan los programas de capacitación, sensibilización, difusión y feedback.

Actividad 1. Registrar la plataforma ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor.

En esta etapa se realiza el proceso de registro de software para la plataforma digital ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor. Se diligencian los formatos solicitados y se suministra la información requerida para el proceso.

- **Responsable:**
Coordinador técnico.
- **Tareas:**
 1. Recopilar la información solicitada por la Dirección Nacional de Derecho de Autor para el registro de software.

- 2. Diligenciar el formato “Solicitud de Inscripción de Soporte Lógico o Software”.
- 3. Suministrar la información requerida.
- **Resultados de la actividad:**
Certificado de derecho de autor del software.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del certificado.

Actividad 2. Preparar el programa de capacitación, sensibilización, difusión y feedback.

En esta etapa se prepara el programa de capacitación, sensibilización, difusión y feedback. Se realizan los procesos de identificación de audiencia, así como el diseño del contenido y materiales necesarios en los eventos. Igualmente se establece un sistema de feedback para obtener la retroalimentación de usuarios y pasajeros.

- **Responsable:**
Coordinador técnico.
- **Tareas:**
 1. Identificar las audiencias clave que recibirán la capacitación y sensibilización, y los eventos de difusión sobre el software y sus beneficios.
 2. Diseñar un programa de capacitación y sensibilización que incluya módulos específicos para diferentes grupos de usuarios, como administradores, técnicos y usuarios finales.
 3. Diseñar estrategias de difusión para comunicar el lanzamiento, los resultados y beneficios de la plataforma.
 4. Diseñar un sistema de feedback que permita a los usuarios de la plataforma proporcionar comentarios y sugerencias sobre esta.
 5. Diseñar un sistema de feedback que permita a los pasajeros del Metro evaluar su satisfacción con la experiencia con base a rubros de evaluación que se relacionen directamente con la implementación de la plataforma, para de esta forma identificar el impacto de la plataforma en la satisfacción de los pasajeros.
 6. Planificar las jornadas de capacitación y sensibilización, y las estrategias de difusión, incluyendo el material, personal, audiencia, espacios, y demás elementos requeridos.
 7. Planificar la recopilación del feedback de los usuarios y los pasajeros para ser comparado con otros datos disponibles.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico sobre los programas de capacitación, sensibilización, difusión y feedback establecidos.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 3. Gestionar la logística y organización de los eventos

En esta etapa se gestiona la logística y organización de los eventos establecidos en los planes de capacitación, sensibilización, difusión y feedback.

- **Responsable:**
Coordinador técnico.

- **Tareas:**
 1. Diseñar un programa detallado para cada evento, que incluya los temas a tratar, los objetivos específicos y la agenda de actividades.
 2. Coordinar la logística de los eventos, incluyendo la selección de ubicaciones, la reserva de espacios, el transporte si es necesario y la disponibilidad de recursos técnicos.
 3. Invitar a los participantes a los eventos con suficiente antelación y proporcionar información detallada sobre la fecha, hora, ubicación y agenda.
 4. Preparar los materiales y recursos necesarios para las presentaciones y demostraciones que se llevarán a cabo durante los eventos.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico sobre la organización de los eventos.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

Actividad 4. Ejecutar los eventos

En esta etapa se ejecutan los eventos estipulados en los planes.

- **Responsable:**
Coordinador técnico. Con apoyo del ingeniero mecánico especialista en sistemas Metro, ingeniero en ciencias computacionales, e administrador tecnológico.
- **Tareas:**
 1. Realizar las presentaciones y demostraciones planificadas durante el evento, asegurándose de que el contenido se presente de manera clara y comprensible.
 2. Facilitar sesiones de discusión y grupos de trabajo para abordar temas específicos relacionados con el proyecto.
 3. Proporcionar oportunidades para establecer contactos y redes entre los participantes, fomentando la colaboración y el intercambio de información.
 4. Recopilar comentarios y retroalimentación de los participantes durante y después del evento.
 5. Evaluar la efectividad del evento y su impacto en la comprensión y el compromiso de los involucrados e interesados.
- **Resultados de la actividad:**
Informe técnico sobre los eventos realizados.
- **Medio de verificación:**
Acta de entrega del informe.

13. MATRIZ DE MARCO LÓGICO

Tabla 8. MML

Resumen de los objetivos		Indicadores	Medios de Verificación	Supuestos
Fin	1. Aumentar la productividad operacional del sistema. 2. Aumentar la competitividad de la empresa. 3. Reducir el costo de ciclo de vida de los activos. 4. Maximizar la disponibilidad de los activos 5. Mejorar la eficiencia energética de la operación y mantenimiento.	1. Aumento del 10% en la productividad operacional del Metro de Medellín para el 2027. 2. Aumento del 5% en la competitividad del Metro de Medellín para el 2027. 3. Reducción del 37% en los costos de ciclo de vida de los rodamientos de tren del Metro de Medellín para el 2027. 4. Incremento del 10% en la disponibilidad operativa del material rodante del Metro de Medellín para el 2027. 5. Reducción del 10% en el consumo de combustible para labores de mantenimiento del Metro de Medellín y aumento del 5% en las toneladas de CO2 evitadas de ser emitidas para el 2027.	Informes y registros en oficina de archivos del Metro de Medellín y municipio de Medellín	1. Las plataformas tecnológicas seleccionadas no son completamente compatibles con los sistemas existentes. 2. Resistencia al cambio por parte del personal y la falta de capacitación adecuada. 3. El servicio no es requerido por la organización. 4. La tecnologías implementadas presentan fallos técnicos que afectan su correcto funcionamiento. 5. La tecnología adquirida se vuelve obsoleta rápidamente.
Propósito	Aumentar la productividad en sistemas ferroviarios gracias a la adecuada gestión de activos por medio de la centralización de los subsistemas.	1 plataforma de gestión de activos de subsistemas centralizados implementada en el Metro de Medellín que aumente la productividad económica del sistema ferroviario en un 10% para el final del año 2027.	Actas de entrega y certificados de finalización en Ministerio de ciencias y entidad financiera.	1. La infraestructura tecnológica actual no es adecuada e impide la implementación efectiva del sistema. 2. Falta personal capacitado para implementar, operar y mantener el nuevo sistema. 3. Los proveedores de tecnología y software necesarios para el proyecto no tienen disponibilidad. 4. Los proveedores tecnología no cumplen con los requisitos del proyecto. 5. Incidentes de ciberseguridad que comprometen la integridad y operatividad del sistema centralizado.
Resultados	1. 2404040 Documentos de investigación. 2. Software de gestión de activos 3. Plataforma de gestión de activos 4. 3999064 Documentos de investigación 5. Registro de software	1. 240404000- 1 Documento de investigación realizado. 2. 1 software de gestión de activos desarrollado 3. 1 plataforma de gestión de activos implementada 4. 3999064 - 1 documento de investigación realizado 5. 1 registro de software obtenido	Radicados en la oficina de archivos del metro de Medellín. Informes y actas de entrega por parte del ejecutor.	1. Proveedores de tecnología y software necesarios para el proyecto no disponibles. 2. Problemas de calidad por parte de los proveedores de los servicios tecnológicos. 3. Falta de acceso a información relevante necesaria para la elaboración de documentos de investigación. 4. Interrupciones o problemas en la provisión continua de servicios tecnológicos. 5. Barreras legales o regulatorias que impiden la construcción o mejora de infraestructura. 6. Falta de personal experto en integración e implementación de servicios de información y gestión de activos.
Actividades	1. Definir los componentes base del sistema de gestión de activos. 2. Establecer las políticas y estrategias de gestión de activos. 3. Establecer los procesos y métricas de gestión de activos. 4. Establecer las políticas y estrategias de gestión. 5. Definir los elementos base de la plataforma. 6. Programar los componentes y ciclo de vida de la plataforma. 7. Integrar los activos digitales a la plataforma. 8. Desarrollar la infraestructura de recopilación y almacenamiento de datos. 9. Integrar los activos digitales a la plataforma. 10. Implementar el sistema de gestión de activos. 11. Integrar el activo digital Insight Rail con la plataforma. 12. Realizar pruebas de funcionamiento. 13. Implementar el sistema de gestión de activos. 14. Gestionar la logística y organización de las pruebas. 15. Ejecutar las pruebas. 16. Ejecutar las pruebas con base en la norma ISO/IEC 25040. 17. Preparar el programa de capacitación, sensibilización, difusión y feedback. 18. Gestionar la logística y organización de los eventos. 19. Ejecutar los eventos.	Presupuesto de las actividades.	Informes de ejecución de presupuestos. Facturas DIAN Documentos soporte.	Las actividades se llevan a cabo según los planes de ejecución del proyecto: plazos y presupuesto.

14. IMPACTOS

Tipo de impacto	Indicadores	Medios de Verificación	Plazo
Medio ambiente y sociedad	Reducción de emisiones de CO2 al año	Registros y estadísticas de MinAmbiente y reporte anual del Metro de Medellín	Largo Plazo
Medio ambiente y sociedad	Reducción del consumo energético al año	Registros y estadísticas de MinAmbiente y reporte anual del Metro de Medellín	Largo Plazo
Productividad y competitividad	Aumento en la productividad operativa del sistema ferroviario	Indicadores RAMS del Metro de Medellín en los reportes anuales	Largo Plazo
Productividad y competitividad	Reducción del costo de ciclo de vida de los activos ferroviarios	Registros y estadísticas financieras en los reportes anuales del Metro de Medellín	Largo Plazo
Productividad y competitividad	Aumento de la disponibilidad operativa del material rodante	Registros y estadísticas del tiempo y recorrido de operación anual del material rodante del Metro de Medellín	Largo Plazo
Productividad y competitividad	Aumento de la competitividad	Registros y estadísticas de la Secretaría de Movilidad de Medellín y reportes del Metro de Medellín sobre pasajeros transportados por tipo de transporte	Largo Plazo
Ciencia y tecnología en las entidades participantes.	Documento de investigación sobre gestión de activos dentro de la organización	Registros de documentación del Metro de Medellín	Mediano Plazo

Ciencia y tecnología en las entidades participantes	Software para gestión de activos dentro de la organización	Registros de software del Metro de Medellín	Mediano Plazo
Ciencia y tecnología en las entidades participantes	Plataforma de gestión de activos dentro de la organización	Registros de TICs del Metro de Medellín	Mediano Plazo
Ciencia y tecnología en las entidades participantes	Documento de investigación de las pruebas sobre la plataforma de gestión de activos	Registros de documentación del Metro de Medellín	Mediano Plazo
Ciencia y tecnología en las entidades participantes	Registro de la plataforma ante la Dirección Nacional de Derechos de Autor	Registros de software de la Dirección Nacional de Derechos de Autor	Mediano Plazo

15. ESTRATEGIA DE DIFUSIÓN

Tipo de Producto	Resultado esperado	Indicador	Beneficiario	Medio de verificación
PONENCIAS	Participación en eventos especializados, presentando la plataforma desarrollada y los resultados obtenidos con su implementación.	1	UNIVERSIDAD EAFIT	Certificado de participación como ponente y soporte del trabajo presentado
EVENTOS CIENTÍFICOS	Organización de eventos especializados, presentando la plataforma y los resultados y beneficios de su implementación.	2	Operadores de sistemas ferroviarios Metro miembros de la red ALAF y de la UIC	Certificación de la organización y realización de eventos científicos, y registro de número de asistentes a cada evento.
ARTICULACIÓN DE REDES DE CONOCIMIENTO	Articulación a la red International Union of Railways	1	UIC	Documento expedido por la entidad referida que certifique de las actividades de articulación de redes.
PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS A LAS AUTORIDADES LOCALES, NACIONALES Y SECTORIALES	Presentación de los resultados tanto actuales como previstos del impacto de la plataforma a las autoridades competentes	1	Ministerio de transporte	Documento que certifique la presentación de los resultados a la autoridad nacional.

16. CRONOGRAMA

Tabla 9. Cronograma.

17. PRESUPUESTO

Tabla 10. Presupuesto – RESUMEN

RESUMEN DEL PRESUPUESTO

Item	Rubro	RESUMEN				TOTAL	
		CONTRAPARTIDA		FINANCIACIÓN			
		Especie	Efectivo				
1	Talento humano	\$ 7,905,000	\$ 463,737,531	\$ 471,642,531		64%	
2	Equipos y software	\$ 10,000,000	\$ 1,638,025	\$ 11,638,025		2%	
3	Capacitación	\$ -	\$ 20,000,000	\$ 20,000,000		3%	
4	Servicios y pruebas	\$ 21,000,000	\$ 30,000,000	\$ 51,000,000		7%	
5	Materiales, insumos y documentación	\$ -	\$ 4,400,000	\$ 4,400,000		1%	
6	Gastos de viaje	\$ -	\$ 28,400,000	\$ 28,400,000		4%	
7	Infraestructura	\$ 96,000,000	\$ -	\$ 96,000,000		13%	
8	Administrativos	\$ -	\$ 54,817,556	\$ 54,817,556		7%	
TOTAL		\$ 134,905,000	\$ 602,993,112	\$ 737,898,112			

Tabla 11. Presupuesto – Talento Humano

NOMBRE / CARGO ESPECÍFICO	JUSTIFICACIÓN	TALENTO HUMANO							FUENTES		
		CANTID/	DEDICACIÓN (h/sem)	Meses	Salario	Salario+Prestaci	TOTAL	Especie	Efectivo		TOTAL
Ingeniero mecánico	Director del proyecto	1	6	24	\$ 11,895,168	\$ 18,437,510	\$ 55,312,531	\$ -	\$ 55,312,531	\$ 55,312,531	
Ingeniero mecánico	Coordinador técnico	1	24	24	\$ 7,000,000	\$ 10,850,000	\$ 130,200,000	\$ -	\$ 130,200,000	\$ 130,200,000	
Tecnólogo en Seguridad y Salud en el Trabajo	Seguridad y Salud en el Trabajo	1	48	2	\$ 2,750,000	\$ 4,262,500	\$ 8,525,000	\$ -	\$ 8,525,000	\$ 8,525,000	
Ingéniero mecánico especialista en sistemas metro	Estructurar sistema de gestión de activos y diseño, gestión y ejecución de pruebas	1	48	13	\$ 5,500,000	\$ 8,625,000	\$ 110,825,000	\$ -	\$ 110,825,000	\$ 110,825,000	
Ingéniero en ciencias computacionales	Programación de la plataforma y sistema de recomendación por machine learning	1	48	10	\$ 5,500,000	\$ 8,625,000	\$ 85,250,000	\$ -	\$ 85,250,000	\$ 85,250,000	
Técnico en TICs	Apoyo en las actividades del proyecto	1	48	7	\$ 1,000,000	\$ 1,550,000	\$ 10,850,000		\$ 10,850,000	\$ 10,850,000	
Administrador tecnológico	Organizar, controlar y evaluar los procesos de gestión tecnológica	1	48	9	\$ 4,500,000	\$ 6,975,000	\$ 62,775,000	\$ -	\$ 62,775,000	\$ 62,775,000	
Conductor de Metro	Apoyo en la ejecución de pruebas	1	48	1	\$ 1,300,000	\$ 2,015,000	\$ 2,015,000	\$ 2,015,000	\$ -	\$ 2,015,000	
Técnico de mantenimiento	Apoyo en la ejecución de pruebas	1	48	1	\$ 1,900,000	\$ 2,945,000	\$ 2,945,000	\$ 2,945,000	\$ -	\$ 2,945,000	
Operador del Puesto Central de Control	Apoyo en la ejecución de pruebas	1	48	1	\$ 1,900,000	\$ 2,945,000	\$ 2,945,000	\$ 2,945,000	\$ -	\$ 2,945,000	
TOTAL								\$ 471,642,531	\$ 7,905,000	\$ 463,737,531	\$ 471,642,531

Tabla 12. Presupuesto – Equipos y Software

EQUIPOS Y SOFTWARE (Descripción)	JUSTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS Y SOFTWARE			CONTRAPARTIDA METRO DE MEDELLÍN		FINANCIADOR	TOTAL
		CANTIDAD	COSTO	TOTAL	Especie	Efectivo		
Alquiler Anual de Software (Java Oracle)	Requerido para Desarrollo de la plataforma y base de datos	1	\$ 138,025	\$ 138,025	\$ -	\$ -	\$ 138,025	\$ 138,025
Firewalls, cifrado de datos (Seguridad de datos)	Seguridad informática para confidencialidad y protección de información importante	1	\$ 1,500,000	\$ 1,500,000	\$ -	\$ -	\$ 1,500,000	\$ 1,500,000
SKF Insight Rail	Pruebas de funcionamiento conjunto de la plataforma y el software Insight Rail	1	\$ 10,000,000	\$ 10,000,000	\$ 10,000,000	\$ -	\$ -	\$ 10,000,000
TOTAL					\$ 11,638,025	\$ 10,000,000	\$ -	\$ 1,638,025 \$ 11,638,025

Tabla 13. Presupuesto – Capacitación

Tema de la capacitación o evento	Justificación	Cantidad	Costo	Total	FUENTES		TOTAL	
					CONTRAPARTIDA			
					entidad incluya los	FINANCIADOR		
					Especie	Efectivo		
Workshops	Sesiones de trabajo con el Metro de Medellín	2	\$ 2,500,000	\$ 5,000,000		\$ 5,000,000	\$ 5,000,000	
Capacitaciones	Capacitación en el uso de la plataforma	2	\$ 2,000,000	\$ 4,000,000		\$ 4,000,000	\$ 4,000,000	
Ponencias	Presentación de resultados en Universidad EAFIT	1	\$ 2,000,000	\$ 2,000,000	\$ -	\$ 2,000,000	\$ 2,000,000	
Eventos científicos	Asistencia a NT EXPO en Sao Paulo e InnoTrans en Berlín	2	\$ 3,500,000	\$ 7,000,000		\$ 7,000,000	\$ 7,000,000	
Presentación a autoridades locales	Presentación de resultados al Ministerio de Transporte	1	\$ 2,000,000	\$ 2,000,000		\$ 2,000,000	\$ 2,000,000	
TOTAL				\$ 20,000,000	\$ -	\$ -	\$ 20,000,000	
							\$ 20,000,000	

Tabla 14. Presupuesto – Servicios

SERVICIO	DESCRIPCIÓN	Cantidad	Costo	Costo total	FUENTES			TOTAL	
					CONTRAPARTIDA		FINANCIADOR		
					METRO DE MEDELLÍN	Especie			
Servicio de testeo de software	Testeo del software para verificación de calidad	1	\$ 30,000,000	\$ 30,000,000			\$ 30,000,000	\$ 30,000,000	
Pruebas de campo	Pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la plataforma	21	\$ 1,000,000	\$ 21,000,000	\$ 21,000,000.00		\$ -	\$ 21,000,000	
TOTAL				\$ 51,000,000	\$ 21,000,000	\$ -	\$ 30,000,000	\$ 51,000,000	

Tabla 15. Presupuesto – Materiales, Insumos y Documentación

Ítem	MATERIALES, INSUMOS Y DOCUMENTACIÓN	JUSTIFICACIÓN	Cantidad	Costo	TOTAL	FUENTES			TOTAL	
						CONTRAPARTIDA		FINANCIADOR		
						*Si hay más de una entidad incluya los datos consolidados	Especie			
1	DOTACIÓN PERSONAL - EPP (PROFESIONALES / UNA DOTACIÓN POR AÑO)	Requerido por el personal	4.00	\$ 500,000	\$ 2,000,000			\$ 2,000,000	\$ 2,000,000	
2	GASTOS OFICINA (PAPELERÍA, FOTOCOPIAS Y OTROS)	Gastos generales	24.00	\$ 100,000	\$ 2,400,000			\$ 2,400,000	\$ 2,400,000	
Total					\$ 4,400,000	\$ -	\$ -	\$ 4,400,000	\$ 4,400,000	

Tabla 16. Presupuesto – Gastos de viaje

DESPLAZAMIENTO (origen y destino)	JUSTIFICACION	No. De Viajes	Costo	TOTAL	FUENTES			TOTAL	
					CONTRAPARTIDA		FINANCIADOR		
					*Si hay más de una entidad incluya los datos consolidados	Especie			
Medellín - Oficina o Sede Metro	Transporte local entre las entidades	600	\$ 4,000	2,400,000			\$ 2,400,000	2,400,000	
Medellín - Sao Paulo	Gastos de viaje para ingeniero en ciencias computacionales (Incluye tiquete ida y regreso + viáticos para una estadía de 3 días)	1	\$ 6,000,000	6,000,000			6,000,000	6,000,000	
Medellín - Berlín	Gastos de viaje para ingeniero mecánico (Incluye tiquete ida y regreso + viáticos para una estadía de 5 días)	1	\$ 20,000,000	20,000,000			20,000,000	20,000,000	
TOTAL				\$ 28,400,000	\$ -	\$ -	\$ 28,400,000	\$ 28,400,000	

Tabla 17. Presupuesto – Infraestructura

INFRAESTRUCTURA				FUENTES			TOTAL	
				CONTRAPARTIDA		FINANCIADOR		
				UNIVERSIDAD EAFIT				
Tipo de infraestructura requerida (adecuación o mejora)	Descripción	Meses	Valor total	Especie	Efectivo	Efectivo		
Arriendo de puesto de trabajo en el Poblado	Puesto de trabajo dotado con computador y demás requerimientos para el trabajo del ingeniero mecánico	13	\$ 3,000,000	\$ 39,000,000.00		\$ -	\$ 39,000,000	
Arriendo de puesto de trabajo en el Poblado	Puesto de trabajo dotado con computador y demás requerimientos para el trabajo del ingeniero en ciencias computacionales	10	\$ 3,000,000	\$ 30,000,000.00		\$ -	\$ 30,000,000	
Arriendo de puesto de trabajo en el Poblado	Puesto de trabajo dotado con computador y demás requerimientos para el trabajo del administrador tecnológico	9	\$ 3,000,000	\$ 27,000,000.00		\$ -	\$ 27,000,000	
TOTAL			\$ 96,000,000	\$ -	\$ -	\$ 96,000,000		

Tabla 18. Presupuesto – Administrativos

COSTOS ADMINISTRATIVOS			FUENTES			TOTAL
			CONTRAPARTIDA (*Si hay más de una entidad)	FINANCIADOR		
DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	VALOR	Especie	Efectivo	Efectivo	
Gastos administrativos y utilidad	10%	\$ 54,817,556			\$ 54,817,556	\$ 54,817,556
TOTAL	\$ 54,817,556	\$ -	\$ -	\$ 54,817,556	\$ 54,817,556	\$ 54,817,556

18. EVALUACIÓN FINANCIERA

Tabla 19. Flujo de caja total.

Tabla 20. Flujo de caja talento humano.

Tabla 21. Flujo de caja equipos y software.

Tabla 22. Flujo de caja capacitación.

CAPACITACIÓN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Workshops													
Capacitaciones													
Ponencias													
Eventos científicos													
Presentación a autoridades locales													
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
												\$ 5.000.000	
												\$ 4.000.000	
												\$ 2.000.000	
												\$ 7.000.000	
												\$ 2.000.000	\$ 2.000.000

Tabla 23. Flujo de caja servicios.

SERVICIOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Servicio de testeo de software													
Pruebas de campo													
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
			\$ 30.000.000									\$ 30.000.000	
			\$ 7.000.000	\$ 7.000.000	\$ 7.000.000							\$ 21.000.000	

Tabla 24. Flujo de caja materiales, insumos y documentación.

MATERIALES, INSUMOS Y DOCUMENTACION		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DOTACIÓN PERSONAL - EPP (PROFESIONALES / UNA DOTACIÓN POR AÑO)		\$ 500.000	\$ 500.000									\$ 1.000.000	
GASTOS OFICINA (PAPELERIA, FOTOCOPIAS Y OTROS)		\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
													\$ 2.000.000
													\$ 2.400.000

Tabla 25. Flujo de caja gastos de viaje.

GASTOS DE VIAJE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Medellin - Oficina o Sede Metro		\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 100.000
Medellin - São Paulo													
Medellin - Berlin													
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
													\$ 2.400.000
													\$ 6.000.000
													\$ 20.000.000
													\$ 20.000.000

Tabla 26. Flujo de caja infraestructura.

INFRAESTRUCTURA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arriendo de puesto de trabajo en el Pobledo		\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000
Arriendo de puesto de trabajo en el Pobledo													
Arriendo de puesto de trabajo en el Pobledo													
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
													\$ 39.000.000
													\$ 30.000.000
													\$ 27.000.000

Tabla 27. Flujo de caja administrativos.

ADMINISTRATIVOS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Gastos administrativos y utilidad		\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 2.284.065	\$ 54.817.556

Tabla 28. Cuantificación de beneficios

Efecto	Nombre	Unidad de medida
Indirecto	Aumento en la productividad	Viajes adicionales en el ciclo de vida por tren
	Aumento de la competitividad	Pasajeros adicionales transportados anuales
	Reducción de costo de ciclo de vida de activos	Años adicionales de vida útil de rodamientos anual
	Aumento en la disponibilidad de material rodante	Años de vida útil adicionales por tren
	Reducción de costos en consumo energético	Galones de combustible ahorrado anual
Externalidad	Ahorro en emisiones de CO2	Toneladas de CO2 evitadas de ser emitidas anuales
	Ahorro en consumo material	Huella material
Intangible	Aumento de la confianza en el servicio	% de aumento de satisfacción de los usuarios
	Mejora en la reputación	% de aumento de aprobación en el mercado
	Aumento de la conciencia ambiental	Cantidad de personas con mayor conciencia ambiental
	Aumento de iniciativas de innovación tecnológica	Cantidad de proyectos tecnológicos innovadores realizados
	Aumento en la aplicación de la gestión de activos	Cantidad de empresas que adoptaron un sistema de gestión de activos

Para la valorización de los beneficios se plantea el siguiente escenario, el cual abarca todas las consideraciones e información necesaria para su adecuado planteamiento:

La entidad beneficiaria cuenta con una flota de 90 trenes de 6 vagones, cada uno trasportando un promedio de 1200 pasajeros. Para satisfacer la demanda de los usuarios, el puesto central de control envía 1 tren de 6 vagones cada 3 minutos, lo que se traduce a 20 trenes por hora. Cada tren recorre 500 km diarios (15000 km mensuales, 180000 km anuales) y su vida útil aproximada es de 4'000.000 de km, lo que implica que, con este desempeño, su ciclo de vida es de 22 años. Estos 500 km diarios son recorridos en la ruta principal del sistema ferroviario, donde un viaje de extremo a extremo es de 25 km, y un recorrido (ida y vuelta) es de 50 km. La ruta principal se compone de 21 estaciones, lo que significa que cada viaje tiene 21 ciclos de carga (arranque y frenado), y cada recorrido 42 ciclos. La velocidad promedio de servicio por tren es de 50 km/h, lo que representa 10 horas de servicio diarias y un recorrido de alrededor de 1 hora basados en los kilómetros diarios recorridos por tren. El servicio de transporte se presta por 20 horas diarias (12 horas pico, 8 horas valle), y ya que cada flota de 20 trenes trabaja 10 horas, se emplea un total de 40 trenes diarios.

Es importante indicar que los valores monetarios utilizados para la valorización están sujetos a un 10% de inflación anual. Por otra parte, los beneficios de la implementación del proyecto se empiezan a ver a partir del 2 año de ser implementada la plataforma. Esto debido a que el primer año se designa para la adaptación de la organización y los trabajadores al uso de esta nueva herramienta.

Del proyecto se desprenden los beneficios evidenciados en la tabla 28. Este carece de beneficios directos, sin embargo, los beneficios indirectos representan el principal enfoque del modelo de negocio planteado. El aumento en la productividad del sistema ferroviario es el principal beneficio del proyecto, representando aproximadamente el 80% de los beneficios. Este es seguido por el aumento en la disponibilidad el 16%, aumento en la competitividad que representa el 3.4%, la reducción de costo de ciclo de vida el 0.17%, el ahorro en emisiones de CO2 el 0.004%, y la reducción de costos en consumo energético de 0.0005%.

El aumento en la productividad se desprende de las diversas mejoras que la plataforma trae al sistema. La gestión de los activos a partir de la información centralizada obtenida de los diferentes servicios de monitoreo de condición facilita la toma de decisiones informadas. Estas decisiones van desde las áreas de mantenimiento, hasta las financieras y administrativas. Esta apreciación conjunta de la correlación entre activos permite la optimización de las estrategias de mantenimiento, la planificación eficaz de rutas y horarios, la potenciación de los factores RAMS, la maximización de los beneficios y la minimización del mal uso de recursos y activos.

Todo esto lleva a lograr niveles más elevados de productividad económica en los sistemas ferroviarios, a la vez que sienta las bases para la diversificación, modernización tecnológica e innovación en el sector del transporte público. Esto se encuentra directamente relacionado con el ODS 8.2, el cual, como indicador, tiene la tasa de crecimiento anual del PIB real por persona empleada. El proyecto no solo aporta al crecimiento anual del PIB, sino que también es un generador de empleo, abriendo nuevas bacantes para satisfacer la creciente demanda del sector transporte.

Adicional a estos beneficios indirectos, el proyecto presenta externalidades como la reducción de las emisiones de CO₂, que se relaciona directamente con la disminución del consumo energético, y la disminución del consumo material, directamente relacionado con el costo de ciclo de vida. Igualmente, brinda beneficios intangibles como el aumento de la confianza en el servicio por parte de los usuarios, lo que a su vez mejora su reputación. Por otra parte, gracias a los aportes a la sostenibilidad, se incrementa la conciencia ambiental, y, debido a la naturaleza innovadora y los beneficios del proyecto, se acrecienta el desarrollo de iniciativas de innovación tecnológica, principalmente enfocadas a la gestión de activos.

Tabla 29. Beneficios generados por el aumento en la productividad

Nombre:	Aumento en la productividad			
Tipo:	Beneficio			
Medición a través de:	Viajes adicionales en el ciclo de vida por tren			
Bien producido:	Pasajeros transportados			
Periodo (años)	Viajes adicionales anuales por tren (viajes/tren)	Pasajeros diarios promedio transportados por tren (pasajeros/tren)	Precio del pasaje (COP/pasaje)	Valor total anual (\$/año)
1	0	1200	\$ 3,000	\$0
2	15840	1212	\$ 3,300	\$253,414,656,000
3	15840	1224	\$ 3,630	\$281,543,682,816
4	15840	1236	\$ 3,993	\$312,795,031,609
5	15840	1249	\$ 4,392	\$347,515,280,117

La adecuada gestión de activos y la predicción de la demanda permite a la entidad beneficiaria reducir en un 10% los trenes utilizados diariamente para la prestación del servicio y pasar de enviar un tren cada 3 minutos a uno cada 4 minutos durante las horas valle, esto sin afectar la calidad del servicio. Gracias a esta mejora en la gestión de los activos y horarios, se prolonga en un 10% la vida útil de los 4 trenes que ya no son utilizados en la jornada. Esto se traduce a 2.2 años adicionales en el ciclo de vida de los 4 trenes, que, a su vez, representa un ahorro de 396.000 km de recorrido. Ya que cada recorrido son 50 km, esta distancia ahorrada implica que los 4 trenes pueden realizar otros 7.920 recorridos a lo largo de su vida útil (15.840 viajes adicionales). Al multiplicar los viajes adicionales anuales por los pasajeros diarios promedio transportados por el precio del pasaje (\$3.000 en el año 1), se obtiene el beneficio anual del aumento de productividad del sistema ferroviario que es de \$253'414.656.000 el segundo año.

Tabla 30. Beneficios generados por el aumento en la competitividad

Nombre:	Aumento en la competitividad				
Tipo:	Beneficio				
Medición a través de:	Pasajeros adicionales transportados anuales				
Bien producido:	Pasajeros transportados				
Periodo (años)	Pasajeros diarios promedio transportados por tren por viaje (pasajeros/tren)	Pasajeros diarios adicionales transportados por tren (pasajeros/tren)	Precio del pasaje (COP/pasaje)	Días en funcionamiento al año (días/año)	Valor total anual (\$/año)
1	1200	0	\$ 3,000	300	\$0
2	1212	1212	\$ 3,300	300	\$10,798,920,000
3	1224	1224	\$ 3,630	300	\$11,997,600,120
4	1236	1236	\$ 3,993	300	\$13,329,333,733
5	1249	1249	\$ 4,392	300	\$14,808,889,778

Asimismo, la plataforma permitirá el incremento de los pasajeros diarios promedio transportados por tren por viaje en un 5%. Debido a la mejor gestión de los activos y horarios, se disminuye en 30 segundos los tiempos entre trenes en las 12 horas pico. Al pasar de un tren cada 3 minutos a uno cada 2.5 minutos, se puede suplir una mayor demanda del servicio, lo que a su vez reduce la acumulación de personas durante las horas pico. Gracias a esta mejora en el servicio, y debido al ahorro de tiempo y mayor confort en los viajes, pasajeros de los sectores del transporte público colectivo y transporte privado son atraídos a usar este servicio por encima de los servicios terrestres sujetos a la congestión vehicular. Sin embargo, debido a este aumento en la frecuencia de servicio de los 36 trenes, la vida útil de estos se ve reducida y las acciones de mantenimiento aumentadas, lo que lleva a solo un 25% de utilidad en esta estrategia. Con base en esto, los pasajeros diarios adicionales transportados por tren serían el 5% del producto de los pasajeros diarios promedio transportados por tren por viaje por los 20 viajes diarios del tren. Si se considera que cada tren está en funcionamiento solo 300 días al año, el valor total anual obtenido, considerando la utilidad, sería de \$10.798'920.000 en el año 2.

Tabla 31. Beneficios generados por reducción de costo de ciclo de vida de activos

Nombre:	Reducción de costo de ciclo de vida de activos					
Tipo:	Beneficio					
Medición:	Años adicionales de vida útil de rodamientos anual					
Bien producido:	Años adicionales de ciclo de vida por rodamiento					
Periodo (años)	Ciclo de vida de rodamiento (años/rodamiento)	Años adicionales de ciclo de vida por rodamiento por total de trenes (años/rodamiento)	Cambios de rodamientos ahorrados por año	Costo de cambio de rodamiento (\$/rodamiento)	Número de rodamientos por tren	Valor total anual (\$/año)
1	6	0	0.0	\$ 7,000,000	48	\$ -
2	6	9	1.5	\$ 7,700,000	48	\$ 554,400,000
3	6	9	1.5	\$ 8,470,000	48	\$ 609,840,000
4	6	9	1.5	\$ 9,317,000	48	\$ 670,824,000
5	6	9	1.5	\$ 10,248,700	48	\$ 737,906,400

Considerando que la vida útil de un rodamiento son 1 millón de ciclos de carga y descarga, y que la ruta principal cuenta con 21 ciclos por viaje, que, por los 20 viajes diarios por tren, da un total de 420 ciclos diarios, la vida útil estimada de un rodamiento es de 6 años. Ya que cada año se adicionan 2.2 años de vida a 4 trenes, esto da un acumulado de aproximadamente 9 años adicionales de vida en total. Con base en esto, si se tienen que hacer cambios de rodamientos cada 6 años, y cada año la plataforma permite aumentar 9 años de vida en total, por año me estaría ahorrando 1.5 cambios de rodamientos. Si cada tren tiene 48 rodamientos, y el cambio de un rodamiento es de alrededor de \$7'000.000 en el año 1 (tomando en cuenta el repuesto, la mano de obra, la grasa, etc.), el dinero ahorrado en cambios de rodamiento en el año 2 sería de \$554'400.000.

Tabla 32. Beneficios generados por aumento en la disponibilidad de material rodante

Nombre:	Aumento en la disponibilidad de material rodante		
Tipo:	Beneficio		
Medición a través de:	Años de vida útil adicionales por tren		
Bien producido:	Años de vida útil		
Periodo (años)	Años de vida útil adicionales por tren (años/tren)	Precio por tren (COP/tren)	Valor total anual (\$/año)
1	0	\$ 43,718,650,930	\$0
2	2.2	\$ 48,090,516,023	\$50,783,584,920
3	2.2	\$ 52,899,567,625	\$55,861,943,412
4	2.2	\$ 58,189,524,388	\$61,448,137,754
5	2.2	\$ 64,008,476,827	\$67,592,951,529

Para el cálculo del aumento de la disponibilidad de material rodante se asume que el costo de un tren de 6 vagones es de 10 millones de euros, lo que, al precio de hoy del peso colombiano, es \$43.718'650.930. Gracias a la utilización de la plataforma, se le adicionan 2.2 años de vida útil a cada tren de los 4 mencionados previamente. Si se toma el costo de cada tren y se ingresan a un banco con una tasa de retorno del 12% anual por los 2.2 años, se obtendría una ganancia de \$50.783'584.920 el año 2.

Tabla 33. Beneficios generados por reducción de costos en consumo energético

Nombre:	Reducción de costos en consumo energético			
Tipo:	Beneficio			
Medición a través de:	Pesos mensuales ahorrados en combustible usado para labores de mantenimiento de trenes			
Bien producido:	Galones de combustible			
Periodo (años)	Consumo aproximado de combustible (galones/mes)	Consumo ahorrado de combustible (galones/mes)	Cantidad (meses/año)	Valor unitario (\$/mes)
1	95	0	12	\$0
2	85	10	12	\$143,060
3	84	11	12	\$157,366
4	83	12	12	\$173,103
5	82	13	12	\$190,413
				Valor total (\$ anual)

Según lo indica la memoria de sostenibilidad del metro de 2022 [102], este consume alrededor de 95 galones/mes de combustible en labores de mantenimiento. Asumiendo que en 2026 (año 1 de la implementación del proyecto) este valor permanece igual, el proyecto permitiría el ahorro de 10 galones/mes de combustible gracias a la optimización de las estrategias y períodos de mantenimiento de los activos. Este ahorro incrementará en un 10% cada año a medida que la organización optimice sus procesos de mantenimiento gracias a la plataforma. Considerando que estas labores de mantenimiento se llevan a cabo los 12 meses del año, y tomando como base el valor de \$14.306 por galón de gasolina en el año 2023, el valor total ahorrado en combustible en el primer año sería de \$1'716.720.

Tabla 34. Beneficios generados por ahorro en emisiones de CO2

Nombre:	Ahorro en emisiones de CO2			
Tipo:	Externalidad			
Medición a través de:	Toneladas de CO2 evitadas de ser emitidas anuales			
Bien producido:	Huella de carbono			
Periodo (años)	Toneladas de CO2 evitadas de ser emitidas anuales (toneladas de CO2/año)	Toneladas de CO2 adicionales evitadas de ser emitidas anuales (toneladas de CO2/año)	Precio de tonelada de CO2 evitada de ser emitida (\$/ton)	Valor total anual (\$/año)
1	415000	0	\$ 527	\$0
2	419150	20958	\$ 580	\$12,149,063
3	423342	21167	\$ 638	\$13,497,609
4	427575	21379	\$ 701	\$14,995,843
5	431851	21593	\$ 772	\$16,660,382

Gracias a la prolongación del ciclo de vida de activos, el ahorro en gasto de combustible en labores de mantenimiento, el aumento en productividad, y los pasajeros que pasaron de usar medios de transporte privado a medios de transporte público impulsados por energías limpias, se estima que se evita la emisión de un 5% adicional de toneladas de CO2 con base en una estimación de 415.000 toneladas evitadas por el Metro de Medellín para 2026. Con base en la memoria de sostenibilidad del Metro para el 2022 [103], la prevención de la emisión de 413.998 toneladas de CO2 tuvo un beneficio ambiental anual valuado en \$218.189 millones de pesos, lo que representa aproximadamente \$527 por tonelada. Por lo tanto, si se multiplica el precio de la tonelada de CO2 evitada de ser emitida por las toneladas adicionales que el uso de la plataforma evita que se emitan, se obtiene un beneficio de \$12'149.063 en el año 2.

Tabla 35. Indicadores financieros

	ÍTEM	RPC	PERIODO				
			0	1	2	3	4
1	Ingresos	1	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
2	Beneficios	1	\$ -	\$ 315,565,426,703	\$ 350,028,452,349	\$ 388,260,400,170	\$ 430,673,973,160
	Aumento en la productividad	1	\$ -	\$ 253,414,656,000	\$ 281,543,682,816	\$ 312,795,031,609	\$ 347,515,280,117
	Aumento de la competitividad	1	\$ -	\$ 10,798,920,000	\$ 11,997,600,120	\$ 13,329,333,733	\$ 14,808,889,778
	Reducción de costo de ciclo de vida de activos	1	\$ -	\$ 554,400,000	\$ 609,840,000	\$ 670,824,000	\$ 737,906,400
	Aumento en la disponibilidad de material rodante	1	\$ -	\$ 50,783,584,920	\$ 55,861,943,412	\$ 61,448,137,754	\$ 67,592,951,529
	Reducción de costos en consumo energético	1	\$ -	\$ 1,716,720	\$ 1,888,392	\$ 2,077,231	\$ 2,284,954
	Ahorro en emisiones de CO2	1	\$ -	\$ 12,149,063	\$ 13,497,609	\$ 14,995,843	\$ 16,660,382
3	Créditos						
4	Costos de inversión		\$ 676,903,855				
	Talento humano	1	\$ 471,642,531	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	Equipos y software	0.77	\$ 8,961,279	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	Capacitación	0.71	\$ 14,200,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	Servicios y pruebas	0.71	\$ 36,210,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	Materiales, insumos y documentación	0.79	\$ 3,476,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	Gastos de viaje	0.8	\$ 22,720,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	Infraestructura	0.79	\$ 75,840,000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
	Administrativos	0.8	\$ 43,854,044	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
5	Amortización de créditos						
6	Intereses de créditos						
7	Valor de salvamento						
	Flujo Neto de Caja		\$ (676,903,855)	\$ -	\$ 3,155,654,267	\$ 3,500,284,523	\$ 3,882,604,002
	VP		\$ (676,903,855)	\$ -	\$ 2,515,668,261	\$ 2,491,433,386	\$ 2,467,465,034
	VPN		\$ 9,241,422,611	>0			
	TIR		175.62%	>12%			

Para el cálculo del flujo neto de caja anual se consideró una utilidad del 1% sobre el total de los beneficios obtenidos. Esto debido a que, por cada beneficio, se deben descontar los gastos operacionales, de mantenimiento, talento humano, entre otros, que al final reducen las ganancias considerablemente.

Conclusiones

- El proyecto tendrá una duración de 24 meses con una inversión total de 737'898.111 COP.
- La mayor distribución de rubros sobre el valor total del proyecto se refleja en un 64% para contratación de personal, 13% en gastos de infraestructura, 7% en gastos administrativos, y 7% en servicios y pruebas.
- De acuerdo con el flujo de caja de la ejecución del proyecto se proponen al menos tres desembolsos correspondientes a un 30% (mes 6), un 30% (mes 18) y un pago final de un 40% (mes 24).
- Con base en el flujo de caja, se estima que el primer producto (objetivo 1) tiene un valor de aproximadamente \$ 150'000.000, el segundo, de \$ 250'000.000, el tercero de \$ 250'000.000, el cuarto de \$ 50'000.000 y el quinto de \$ 40'000.000.
- Mediante el análisis costo beneficio se evidencia que es conveniente financiar el proyecto, ya que presenta una VPN positiva (mayor a cero) y una TIR del 175.62% (mayor a la TSD).

19. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible United Nations.* Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/> (Visitado: 31 July 2023).
- [2] Gobierno de Colombia. (2018). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022.* Disponible en: https://www.sic.gov.co/sites/default/files/documentos/122018/Bases_Plan_Nacional_de_Desarrollo_2018-2022.pdf
- [3] Gobierno de Colombia. (2022). *Plan nacional de desarrollo 2022-2026.* Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>
- [4] Gobernacion de antioquia. (2020). Plan de desarrollo unidos por la vida. Disponible en: <https://antioquia.gov.co/prensa/hist%C3%B3rico-de-prensa-2/8816-el-plan-de-desarrollo-unidos-por-la-vida-20202023-un-ejercicio-de-descentralizacion-de-gobierno-para-la-equidad>
- [5] Alcaldía de Medellín. (2020). *Plan de desarrollo. Medellín futuro.* Disponible en: https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/PlanDesarrollo/Publicacion_es/Shared%20Content/Documentos/2020/DocumentoFinal_PlanDesarrolloMedellin2020-2023_MedellinFuturo.pdf
- [6] Van der Westhuizen, N. J. Gräbe, P. J. (octubre de 2013). The integration of railway asset management information to ensure maintenance effectiveness. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering.* Vol 55 No 3, páginas 18–29, artículo 894. ISSN 2309-8775. Disponible en: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192013000300003
- [7] Barnard, D., Brill, R., Toensing, E. (mayo de 2021). An innovative approach: Digital asset management for rail systems. *Siemens Mobility Digital asset management for rail systems whitepaper.* Disponible en: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/services/digital-services/digital-asset-management-for-rail-systems.html>
- [8] SKF. (s.f.). Insight Rail. Disponible en: <https://www.skf.com/uk/industries/railways/solutions/insight-rail>
- [9] IBM. (s.f.). ¿Qué es un CMMS?. Disponible en: <https://www.ibm.com/mx-es/topics/what-is-a-cmms>
- [10] Rockwell Automation Inc. (s.f.). Asset performance management (APM). Disponible en: [https://www.fiixsoftware.com/glossary/asset-performance-management/#:~:text=Asset%20performance%20management%20\(APM\)%20is,lifecycle%20value%20while%20reducing%20downtime.](https://www.fiixsoftware.com/glossary/asset-performance-management/#:~:text=Asset%20performance%20management%20(APM)%20is,lifecycle%20value%20while%20reducing%20downtime.)
- [11] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). SITVA. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/movilidad/Paginas/transporte-publico/sitva.aspx#:~:text=El%20Metro%3A,promedio%20de%2037%20km%2Fh.>

- [12] Metro de Medellín Ltda. (27 de enero de 2023). Plan de Acción, Formulación 2023. Disponible en: https://www.metrodemedellin.gov.co/hubfs/Plan_de_accion_2023_Forumulaci%C3%B3n%20-%20versi%C3%B3n%201.pdf
- [13] Restrepo-González, G. (2000). El concepto y alcance de la gestión tecnológica. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* (21), 178-185. doi: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.325929>
- [14] Equipo docente del Postgrado en Business Data Analytics y Marketing Intelligence. (11 de mayo de 2022). *¿Qué son los KPI de gestión? - Blog IL3 - UB.* Obtenido de FUNDACIÓ INSTITUT DE FORMACIÓ CONTÍNUA DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA: <https://www.il3.ub.edu/blog/que-son-los-kpi-de-gestion/>
- [15] Santander Universidades. (2 de noviembre de 2022). *Qué es un KPI: ejemplos / Blog Becas Santander.* Obtenido de Becas-santander.com: <https://www.becas-santander.com/es/blog/ejemplo-de-kpi.html>
- [16] Corredera, Á. a. (2016). An automated monitoring system for surveillance and KPI calculation. *2016 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, 1-6. doi:10.1109/EESMS.2016.7504806
- [17] Ding, S. X. (2013). A Novel Scheme for Key Performance Indicator Prediction and Diagnosis with Application to an Industrial Hot Strip Mill. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(4), 2239-2247. doi:10.1109/TII.2012.2214394
- [18] Siemens Mobility. (s.f.). Railigent X for 100% system availability. Disponible en: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/services/digital-services/railigent.html>
- [19] Siemens Mobility. (s.f.). Controlguide Digital Station and Power Manager (DSPM). Disponible en: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/automation/digital-station-solutions-and-railway-communication.html>
- [20] Comunicación y Relaciones con los Medios- Indra. (14 de agosto de 2012). *Indra implanta su tecnología inteligente para la gestión del tráfico y el transporte público de Medellín por 9 m€.* Madrid, España. Obtenido de <https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-implanta-tecnologia-inteligente-gestion-trafico-transporte-publico-medellin-9>
- [21] Metro de Medellín Ltda. (2022). *Conclusión general sobre la evaluación del Sistema de Control Interno.* Medellín. Obtenido de <https://www.metrodemedellin.gov.co/hubfs/Transparencia/planeacion-presupuestos-informes/Conclusiones-Informe-Estado-Control-Interno-Metro-de-MedellIn-Julio-Diciembre-2022.pdf>
- [22] Planeación Estratégica-Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada. (2022). *Plan de acción 2022.* Medellín. Obtenido de <https://www.metrodemedellin.gov.co/hubfs/Transparencia/plan-de-accion/Seguimiento-Trim-4-2022-Plan-de-Accion.pdf>
- [23] Álvarez, D. (2022). *Trenes de carga inteligentes.* Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas-CEPAL. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47749/1/S2100723_es.pdf

- [24] Martínez, V., & de Andrade, D. (2019, November 15). *Monitoreo de vías férreas SKF - Evolution*. Evolution Online. <https://evolution.skf.com/es/monitoreo-de-vias-ferreas-skf/>
- [25] UIC. (2023). *2022 GLOBAL RAIL SUSTAINABILITY REPORT*. UIC. Obtenido de: <https://uic.org/IMG/pdf/global-rail-sustainability-report-2022.pdf>
- [26] Lázares, A. (3 de agosto de 2016). ¿Por qué medir el desempeño del Sistema de Gestión de Activos / Activos? (Parte 1). Obtenido de LinkedIn: <https://es.linkedin.com/pulse/por-qu%C3%A9-medir-el-desempe%C3%B1o-del-sistema-de-gesti%C3%B3n-alexis-1%C3%A1rez-cmrp>
- [27] Aristizábal, P. (21 de octubre de 2019). Conozca cuáles son las inversiones que tendrán los metros que planea América Latina. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/globoeconomia/conozca-cuales-son-las-inversiones-que-tendran-los-metros-que-planea-america-latina-2922944>
- [28] IEA. (2019). *The Future of Rail, Opportunities for energy and the environment*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>
- [29] Statista. (2023). *Global rail passenger traffic from 2018 to 2020, by region*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/263546/global-rail-passenger-activity-by-region/>
- [30] EL CONGRESO DE COLOMBIA. (2023). PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2022-2026. *COLOMBIA POTENCIA MUNDIAL DE LA VIDA- TEXTO CONCILIADO DEL PROYECTO DE LEY NÚMERO 274 de 2023 CÁMARA – 338 de 202 SENADO*. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-05-texto-conciliado-PND.pdf>
- [31] SKF. (n.d.). <https://www.skf.com/group/industries/railways/solutions/insight-rail>
- [32] *Intelligent Asset Management*. Intelligent Asset Management Solutions | Hitachi Rail. (n.d.). <https://www.hitachirail.com/products-and-solutions/operation-service-and-maintenance/intelligent-asset-management/>
- [33] *Remote Condition Monitoring – Strukton Rail*. Rail EN. (2022, February 2). <https://struktonrail.com/expertises/data-capturing/remote-condition-monitoring/>
- [34] *Roadmaster® Intelligent diagnostic platform*. voestalpine Railway Systems. (n.d.). <https://www.voestalpine.com/railway-systems/en/products/roadmaster-intelligent-diagnostic-platform/>
- [35] Ltd, P. R. C. (n.d.). *The Railway Technical Website*. Bogies | The Railway Technical Website | PRC Rail Consulting Ltd. <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-1/bogies.html>
- [36] Jones, T. B. (2018, June 22). *US20190391049A1 - Smart Rail Wheelset bearing*. Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US20190391049A1>
- [37] Gao, S. (2017). Automatic Detection and Monitoring System of Pantograph Catenary in China's High-Speed Railways. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (Volume: 70). doi: 10.1109/TIM.2020.3022487

- [38] Karaduman, G., Karakose, M., Akin, E. (2018). Condition Monitoring Platform in Railways Based on Iot. *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*. doi: 10.1109/IDAP.2018.8620872
- [39] Rendic, M. F., Casanova, Y. L., Araya, J. F. (2022). Sistema de monitoreo continuo de condición (mcc) para correas transportadoras basado en un sensor distribuido de fibra óptica. *Google Patents*. [https://patents.google.com/patent/WO2022011487A1/es?q=\(sistema+de+monitoreo+\)&q=\(diagnostico\)&inventor=y&after=priority:20180101](https://patents.google.com/patent/WO2022011487A1/es?q=(sistema+de+monitoreo+)&q=(diagnostico)&inventor=y&after=priority:20180101)
- [40] Mohammadi, A., Amador-Jimenez, L., & Nasiri, F. (2019). Review of asset management for metro systems: challenges and opportunities. *Transport Reviews*, 39(3), 309-326. doi:10.1080/01441647.2018.1470119
- [41] Sauni, M., Luomala, H., Kolisoja, P., & Vaismaa, K. (2022). Framework for implementing track deterioration analytics into railway asset management. *Built Environment Project and Asset Management*, 12(6), 871-886. doi:10.1108/BEPAM-04-2022-0058
- [42] Shubs Jr, A., Seaton, J. D., & Roenspies, D. M. (28 de Noviembre de 2017). *Estados Unidos Patente N.º US 9,828,013 B2*. Obtenido de [https://patents.google.com/patent/US9828013B2/en?q=\(Asset+train+management\)&oq=Asset+train+management](https://patents.google.com/patent/US9828013B2/en?q=(Asset+train+management)&oq=Asset+train+management)
- [43] 黄学军, 隋志毅, 王志晓, & 朱峰浩. (2013). *China Patent No. CN103093320A*. Retrieved from [https://patents.google.com/patent/CN103093320A/en?q=\(Asset+metro+management\)&oq=Asset+metro+management](https://patents.google.com/patent/CN103093320A/en?q=(Asset+metro+management)&oq=Asset+metro+management)
- [44] Shang, Y., van den Boomen, M., de Man, A., Wolfert, R. (2019). Reliability-based life cycle costing analysis for embedded rails in level crossings. *Proc IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 0(0) 1–13. DOI: 10.1177/0954409719866359
- [45] Rama, D., Andrews, J. D., (2016). Railway infrastructure asset management: the whole-system life cost analysis. *IET Journals. RRUKA Conference Special Issue*. DOI: 10.1049/iet-its.2015.0030
- [46] Liu, H., Rahman, M., Rahimi, M., Starr, A., Durazo-Cardenas, I., Ruiz-Carcel, C., Ompusunggu, A., Hall, A., Anderson, R (2023) An autonomous rail-road amphibious robotic system for railway maintenance using sensor fusion and mobile manipulator, *Computers and Electrical Engineering*, Volume 110. ISSN 0045-7906. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108874>
- [47] United Nations. (2023). Shrinking our material footprint is a global imperative. *Unstats*. Obtenido de <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-12/>
- [48] Our World in Data. (2019). *Domestic material consumption per capita*. Obtenido de Our World in Data: <https://ourworldindata.org/grapher/domestic-material-consumption-per-capita?tab=table&country=~COL>
- [49] Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., Peng, J. (2020). Life Cycle Cost, Energy and Carbon Assessments of Beijing-Shanghai High-Speed Railway. *Sustainability*. 12(1):206. <https://doi.org/10.3390/su12010206>

- [50] Railisa. (2021). *Worldwide Rail Transport Regional Share – 2021*. UIC. Obtenido de: <https://uic.org/support-activities/statistics/>
- [51] Eurostat. (2023). *Nature of expenditure in principal railway enterprises, by type of expenditure*. Obtenido de Eurostat Data Browser: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail_ec_expend/default/map?lang=en
- [52] British Standard. (2014). Asset management — Management systems — Requirements (ISO 55001:2014). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/55089.html>
- [53] SKF. (s.f.). Requisitos de Rendimiento y Condiciones de Funcionamiento. Disponible en: <https://www.skf.com/co/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/performance-and-operating-conditions>
- [54] Andres C. Marquez, Antonio F. Carmona, Jose A. Marcos, Javier Navarro. (2020). Designing CBM Plans, Based on Predictive Analytics and Big Data Tools, for Train Wheel Bearings. *Computers in Industry* (Volumen 122). <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103292>
- [55] Hongrui Cao, Fei Fan, Kai Zhou, Zhengjia He. (2016). Wheel-bearing fault diagnosis of trains using empirical wavelet transform. *Measurement* (Volumen 82). <https://doi.org/ezproxy.eafit.edu.co/10.1016/j.measurement.2016.01.023>
- [56] SKF (2021). Extend maintenance intervals and avoid costly downtime — part 2— . Disponible en: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196809b4f14/pdf_preview_medium/0901d196809b4f14_pdf_preview_medium.pdf
- [57] Jason Mais, Scott Brady. (2002). — Introduction guide to vibration monitoring. Disponible en: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802179ea/pdf_preview_medium/0901d196802179ea_pdf_preview_medium.pdf
- [58] British Standard. (2018). Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines — (BS ISO 17359:2018). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/71194.html>
- [59] International Association of Public Transport (UITP). (2023). UITP URBAN RAIL SEMINAR 2023— SUCCESS STORIES OF INDIA AND SOUTHEAST ASIA. Reporte de seminario, Bruselas. Obtenido de <https://cms UITP.org/wp/wp-content/uploads/2023/03/UITP-Urban-Rail-Seminar-Report-2023.pdf>
- [60] Lázares, A. (3 de agosto de 2016). ¿Por qué medir el desempeño del Sistema de Gestión de Activos / Activos? (Parte 1). Obtenido de LinkedIn: <https://es.linkedin.com/pulse/por-qu%C3%A9-medir-el-desempe%C3%B1o-del-sistema-de-gesti%C3%B3n-alexis-l%C3%A1rez-cmrp>
- [61] British Standard. (2014). Automation systems and integration — Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 1: Overview, concepts and terminology (ISO 22400-1:2014). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/56847.html>
- [62] British Standard. (2014). Automation systems and integration — Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 2:

Definitions and descriptions (ISO 22400-2:2014). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/54497.html>

- [63] British Standard. (2018). Automation systems and integration — Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 10: Operational sequence description of data acquisition (ISO/TR 22400-10:2018). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/71283.html>
- [64] British Standard. (2017). Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing (ISO 15686-5:2017). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/61148.html>
- [65] British Standard. (2015). Quality management systems — Fundamentals and vocabulary (ISO 9000:2015). Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:en>
- [66] British Standard. (2015). Quality management systems — Requirements (ISO 9001:2015). Disponible en: <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>
- [67] British Standard. (2016). Quality management systems — Guidelines for the application of ISO 9001:2015 (ISO/TS 9002:2016). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/66204.html>
- [68] Park, K. J., Lee, H. J., Kim, G. D., An, T. K., Han, S. Y., (29 de diciembre de 2005). *KR1020050060245 - INFORMATION SYSTEM FOR ECONOMICAL MAINTENANCE SYSTEM OF RAILWAY CARS BASED ON MINIMIZED/OPTIMIZED LIFE CYCLE COST.* Disponible en: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=KR728366>
- [69] Voestalpine. (s.f.). Life Cycle Cost Optimization. Disponible en: <https://shorturl.at/lshWx>
- [70] Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit (2022). “A risk-informed decision support tool for the strategic asset management of railway track infrastructure” Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09544097211038373>
- [71] 基于区块链技术的铁路关键资产管理系统 *China Patent No. CN112101585.* Disponible en: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN314071137&cid=P10-LLGYS1-21237-1>
- [72] Trapeze. (s.f.). Gestión de activos empresariales (EAM). Disponible en: <https://www.trapezegroup.com/solutions-rail/eam>
- [73] Van Der Lei, T., Herder, P., Wijnia, Y. (2012). Asset Management: The State of the Art in Europe from a Life Cycle Perspective, 9789400727243, pp. 1-172. DOI: 10.1007/978-94-007-2724-3. Disponible en: <https://rb.gy/dzo8m>
- [74] British Standard. (2014). Asset management — Overview, principles and terminology (ISO 55000:2014). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/55088.html>
- [75] British Standard. (2014). Asset management — Management systems — Requirements (ISO 55001:2014). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/55089.html>
- [76] British Standard. (2018). Asset management — Management systems — Guidelines for the application of ISO 55001 (ISO 55002:2018). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/70402.html>

- [77] British Standard. (2022). Information technology — Artificial intelligence — Process management framework for big data analytics (ISO/IEC 24668). <https://www.iso.org/standard/78368.html>
- [78] Published Document. (2020). Information technology — Big data reference architecture — Part 1: Framework and application process (ISO/IEC TR 205471). <https://www.iso.org/standard/71275.html>
- [79] Dadashi, N., Golightly, D., Sharples, S., & Bye, R. (2023). Intelligent Infrastructure: User-centred Remote Condition Monitoring (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315587288>
- [80] Jimenez, J. (13 de septiembre de 2022). *Tendencias, retos y oportunidades que están marcando el sector ferroviario.* elEconomista. Disponible en: <https://revistas.eleconomista.es/transporte/2022/septiembre/tendencias-retos-y-oportunidades-que-estan-marcando-el-sector-ferroviario-EG12059490>
- [81] van Velthoven, M. (s.f.). ASSET MANAGEMENT IN THE RAIL INDUSTRY. Recuperado de ZNAPZ. Disponible en: <https://www.znapz-assetmanagement.com/wp-content/uploads/2016/08/asset-management-in-the-rail-industry.pdf>
- [82] Kumari, J., Karim, R., Thaduri, A., Castaño, M. (2021). Augmented asset management in railways – Issues and challenges in rolling stock. *Journal of Rail and Rapid Transit*. DOI: 10.1177/09544097211045782. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/354554200_Augmented_asset_management_in_railways_-Issues_and_challenges_in_rolling_stock
- [83] van der Westhuizen, N J, & Gräbe, P J. (2013). The integration of railway asset management information to ensure maintenance effectiveness. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 55(3), 18-29. Recuperado en septiembre 10, 2023, de http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192013000300003&lng=en&tlang=en
- [84] British Standard. (2017). Systems and software engineering — Software life cycle processes (ISO /IEC/IEEE 12207:2017). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/63712.html>
- [85] British Standard. (2023). Systems and software engineering — System life cycle processes (ISO/IEC/IEEE 15288:2023). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/81702.html>
- [86] British Standard. (2017). Information technology — IT asset management — Part 1: IT asset management systems — Requirements (ISO/IEC 19770-1:2017). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/68531.html>
- [87] British Standard. (2014). Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Guide to SQuaRE (ISO/IEC 25000:2014). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/64764.html>
- [88] British Standard. (2022). Software and systems engineering — Software testing (ISO/IEC/IEEE 29119:2022). Disponible en: <https://www.iso.org/standard/81291.html>
- [89] Eurostat. (2023). *Rail transport of passengers*. Eurostat. Obtenido de: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ttr00015/default/line?lang=en>

- [90] Reports and Data. (2022). *Railway Management System Market*. Reports and Data. Obtenido de: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/railway-management-system-market>
- [91] Global Market Insights. (septiembre, 2023). *Railway Management System Market Size*. Global Market Insights. Obtenido de: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/railway-management-system-market>
- [92] Singh, P., Elmi, Z., Krishna Meriga, V., Pasha, J., Dulebenets, M. A.(julio, 2022). Internet of Things for sustainable railway transportation: Past, present, and future. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. Volume 4. <https://doi.org/10.1016/j.clsn.2022.100065>.
- [93] StartUs Insights. (2023). *Explore the Top 10 Rail Industry Trends in 2024*. StartUs Insights. Obtenido de: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/top-10-rail-industry-trends-innovations-2021-beyond/>
- [94] LAVCA. (2022). *LAVCA data on private capital activity in Latin America through year-end 2021*. LAVCA. Obtenido de: <https://lavca.org/industry-data/2022-lavca-industry-data-and-analysis/>
- [95] Network Rail. (2023). *Public performance measure and delay responsibility*. Network Rail. Obtenido de: <https://www.networkrail.co.uk/who-we-are/how-we-work/performance/railway-performance/public-performance-measure-and-delay-responsibility/>
- [96] Transport Focus. (8 de septiembre de 2023). *Rail User Survey*. Transport Focus. Obtenido de: <https://d3cez36w5wymxj.cloudfront.net/wp-content/uploads/2023/09/08093439/Rail-User-Survey-8-September.pdf>
- [97] UIC Safety Unit. (octubre de 2022). *UIC Safety Report 2022. Significant Accidents 2021 Public Report*. UIC. Obtenido de: https://safetydb.uic.org/IMG/pdf/uic_safety_report_2022.pdf
- [98] Agrawal, P. (18 de mayo de 2020). *Big data analytics for asset management in Indian Railways*. Global Railway Review. Obtenido de: <https://www.globalrailwayreview.com/article/100714/big-data-analytics-asset-management-indian-railways/>
- [99] Connor, P. (2023). *Train Maintenance*. The Railway Technical Website. Obtenido de: <http://www.railway-technical.com/trains/train-maintenance/>
- [100] Mohamad Idris, M. F., Saad, N., Yahaya, M., & Shuib, A., Mohamed, W., Amin, A. (2022). Cost of Rolling Stock Maintenance in Urban Railway Operation: Literature Review and Direction. *Pertanika Journal of Science and Technology*. 30. 1045-1071. DOI: 10.47836/pjst.30.2.11.
- [101] UIC. (2015). *Rail Transport and Environment, Facts & Figures*. UIC. Obtenido de: https://uic.org/IMG/pdf/facts_and_figures_2014_v1.0-4.pdf
- [102] Metro de Medellín. (2022). *Memoria de Sostenibilidad*. Metro de Medellín. Obtenido de: <https://www.metrodemedellin.gov.co/hubfs/memorias-de-sostenibilidad/2022/Memoria-de-sostenibilidad-2022.pdf>
- [103] Concejo de Medellín. (13 de julio de 2023). *El Metro de Medellín presentó su informe de Memoria de Sostenibilidad 2022 ante el Concejo Distrital*. Obtenido de: https://www.concejodemedenllin.gov.co/es/node/7278?language_content_entity=es#:~:text=En%20el%20a%C3%B1o%202022%2C%20se,de%20%24218.189%20millones%20de%20pesos.

