

Estrategia de implementación de inteligencia artificial para el mantenimiento predictivo en el sistema ferroviario español

Daniel Armando Jiménez Mora

Gabriel Rivera Otero

Master en Inteligencia Artificial Aplicada, Instituto Europeo de Posgrado

Seminario TFM

Docente Julián Camilo Ortega Gómez

27 de marzo de 2026

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de una solución basada en inteligencia artificial para mejorar el proceso de mantenimiento de la infraestructura ferroviaria y del material rodante del sistema ferroviario español, gestionado por Adif y operado principalmente por Renfe. La propuesta surge a través de la problemática asociada a la detección tardía de fallos, que impacta en la calidad del servicio, la seguridad operativa y los costos de mantenimiento.

La solución planteada consta de la implementación de un sistema de mantenimiento que se basa en condición apoyado en el uso de sensores instalados en trenes comerciales, los cuales actúan como plataformas de monitoreo continuo de la infraestructura ferroviaria. A partir de la recolección de datos en tiempo real, se desarrollan modelos de inteligencia artificial capaces de identificar patrones, anomalías y posibles fallos antes de que estos se conviertan en incidencias operativas.

El sistema integra componentes tecnológicos, como dispositivos de captura de datos, sistemas de comunicación, infraestructura de procesamiento y plataformas de visualización, así como la participación de distintos departamentos organizacionales responsables de la operación, la supervisión, y la mejora continua del sistema. La implementación se estructura mediante un plan de acción que incluye la instalación de sensores, el desarrollo de la infraestructura tecnológica, el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial, la realización de pruebas en campo, y el despliegue progresivo de la solución.

El alcance del proyecto se limita a la red de alta velocidad y servicios de cercanías, considerando exclusivamente trenes operados por Renfe y excluyendo otros operadores ferroviarios y elementos como estaciones o infraestructura complementaria. De la misma manera, la solución tiene un carácter de apoyo a la toma de decisiones, sin sustituir las actividades de mantenimiento realizadas por el personal técnico.

Finalmente, se establece un cronograma de ejecución y una asignación de responsabilidades que permiten garantizar la viabilidad del proyecto, así como una planificación de los recursos necesarios para su correcta implementación. En conjunto, la propuesta busca contribuir en la optimización del mantenimiento ferroviario mediante un enfoque predictivo, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo la probabilidad de fallos en el sistema.

Palabras clave: mantenimiento predictivo, inteligencia artificial, ferrocarril, monitoreo en tiempo real, infraestructura ferroviaria, análisis de datos.

Abstract

This project aims to design an artificial intelligence-based solution to improve the maintenance process of the railway infrastructure and rolling stock of the Spanish railway system, managed by Adif and primarily operated by Renfe. The proposal arises from the problems associated with the late detection of failures, which impacts service quality, operational safety, and maintenance costs.

The proposed solution consists of implementing a condition-based maintenance system supported by the use of sensors installed on commercial trains, which act as continuous monitoring platforms for the railway infrastructure. Based on real-time data collection, artificial intelligence models are developed that are capable of identifying patterns, anomalies, and potential failures before they become operational incidents.

The system integrates technological components, such as data capture devices, communication systems, processing infrastructure, and visualization platforms, as well as the participation of various organizational departments responsible for the operation, supervision, and continuous improvement of the system. The implementation is structured through an action plan that includes the installation of sensors, the development of the technological infrastructure, the training of artificial intelligence models, the conduct of field tests, and the progressive deployment of the solution.

The scope of the project is limited to the high-speed network and commuter services (Cercanías), exclusively considering trains operated by Renfe and excluding other railway operators and elements such as stations or complementary infrastructure. Similarly, the solution serves as a decision-making support tool, without replacing the maintenance activities carried out by technical personnel.

Finally, an execution schedule and an allocation of responsibilities are established to guarantee the feasibility of the project, along with a planning of the resources necessary for its correct implementation. Altogether, the proposal seeks to contribute to the optimization of railway maintenance through a predictive approach, improving operational efficiency and reducing the probability of system failures.

Keywords: Predictive maintenance, artificial intelligence, railway systems, real-time monitoring, railway infrastructure, data analysis.

Tabla de contenido

Introducción	5
Objetivo General.....	6
Objetivos Específicos	6
Metodología	7
Identificación y Análisis del Problema	8
Planificación de la Solución	9
Descripción de la empresa a intervenir	12
Misión	12
Visión	13
Mapa de procesos	15
Descripción del proceso a intervenir	18
Descripción del problema que presenta el proceso	18
Establecimiento de planes de acción para la solución del problema.....	20
Establecimiento de objetivos	20
Descripción de la solución	21
Secuencia de actividades para ejecución de la solución.....	26
Preparación (Meses 1-3)	26
Proyecto piloto(Meses 4-8).....	26
Escalado y despliegue (Meses +9)	27
Optimización y Evaluación Continua(1-2 años)	27
Descripción de recursos necesarios para la ejecución de la solución	27
Definición del alcance de la solución, partes interesadas, cronograma y presupuestos.....	30
Alcance final de la solución	30
Identificación de responsables de las actividades para ejecución	31
Cronograma de ejecución	33
Presupuesto	34
Referencias bibliográficas	38

Introducción

El transporte ferroviario es uno de los pilares fundamentales cuando hablamos de la movilidad sostenible en Europa, ya que permite el desplazamiento eficiente de pasajeros y mercancías a gran escala, que tiene un impacto ambiental reducido en comparación con otros medios de transporte. Para el caso de España, el sistema ferroviario ha experimentado un desarrollo importante en las últimas décadas, especialmente con la expansión y crecimiento de la red de velocidad, así como la modernización de los servicios de transporte regional y metropolitano.

En cuanto a la gestión del sistema ferroviario español, se encuentra dividida entre diferentes entidades públicas y operadores. Por un lado, tenemos a Adif, quien es responsable de la gestión y el mantenimiento de la infraestructura ferroviaria, incluyendo vías, estaciones, y sistemas de señalización. También tenemos a Renfe por otro lado, y este opera gran parte de servicios de transporte ferroviario de pasajeros, así como de mercancías, aunque en los últimos años, este sector ha experimentado un proceso de liberación que ha permitido que nuevos operadores entren también.

Ahora bien, a pesar de estos avances en infraestructura y tecnología, el sistema ferroviario ha enfrentado diversos desafíos relacionados con la gestión y mantenimiento de la red. El incremento de tráfico ferroviario, el envejecimiento de la infraestructura, y limitaciones de procesos de mantenimientos han generado un aumento en las incidencias operativas, como son retrasos, limitaciones de velocidad temporales, y fallos críticos en sistemas de la red ferroviaria. Estas situaciones afectan sumamente la eficiencia del servicio, la puntualidad de las operaciones, y el cómo perciben la calidad los usuarios y cómo estos se ven afectados.

Bajo este contexto, el proceso de mantenimiento a infraestructura ferroviaria adquiere importancia estratégica para poder garantizar la seguridad y continuidad del servicio. Sin embargo, muchos de estos procesos de mantenimiento aún dependen en gran parte a las inspecciones periódicas y de la detección reactiva de fallos, lo que puede dificultar identificar de manera oportuna y temprana de posibles y potenciales fallas en la infraestructura.

Con este panorama, el desarrollo de herramientas basadas en inteligencia artificial ofrece nuevas oportunidades que permiten mejorar la gestión del mantenimiento ferroviario. El uso de modelos de análisis predictivo permite identificar patrones y anticipar fallos posibles en infraestructura, antes de que se conviertan en incidencias operativas.

El presente proyecto propone el desarrollo de una estrategia de mantenimiento predictivo basado en inteligencia artificial, aplicada a procesos de mantenimiento de infraestructura ferroviaria gestionada por Adif. Dicha propuesta busca contribuir a mejorar la detección temprana de fallos, optimizar la planificación de intervenciones de mantenimiento y fortalecer la eficiencia operativa del sistema ferroviario.

Objetivo General

Desarrollar una propuesta de mejora orientada a la optimización del proceso de mantenimiento de la infraestructura ferroviaria mediante el uso de herramientas de análisis predictivo basadas en inteligencia artificial, con el fin de reducir la detección tardía de fallos y mejorar la eficiencia en la operación de sistemas, los cuales son gestionados por Adif y cuya infraestructura es utilizada por operadores como Renfe.

Objetivos Específicos

Para cumplir con el objetivo general, se establecieron cinco objetivos específicos:

1. Analizar el proceso actual del mantenimiento de infraestructura ferroviaria, para identificar los factores que contribuyen a la detección tardía de fallos y determinar sus posibles causas dentro del contexto operativo del sistema ferroviario.
2. Identificar las variables y fuentes de datos relevantes que puedan ser utilizadas para el monitoreo y análisis de infraestructura ferroviaria, con el propósito de facilitar la detección temprana de posibles fallos.

3. Diseñar una propuesta de mejora basada en técnicas de análisis de datos e inteligencia artificial que permita anticipar fallos en la infraestructura ferroviaria y optimizar la planificación de las intervenciones de mantenimiento.
4. Evaluar el impacto potencial de la propuesta en términos de mejora en la eficiencia del mantenimiento, reducción de incidencias operativas y fortalecimiento de la confiabilidad del sistema ferroviario.
5. Definir los lineamientos para la implementación de la propuesta dentro de la estructura organizacional de Adif, considerando recursos, responsables, y un cronograma preliminar de ejecución.

Metodología

El presente proyecto fue desarrollado utilizando la metodología de investigación-acción, la cual permite analizar problemáticas reales dentro de una organización y proponer soluciones orientadas a mejorar los procesos. Este enfoque metodológico combina un análisis técnico con la aplicación práctica, facilitando así la identificación práctica, facilitando la identificación de fallos y problemas, el diseño de propuestas de mejora y la evaluación de posibles intervenciones en el contexto organizacional.

En el marco de este proyecto, la metodología se aplicó al análisis del proceso de mantenimiento de la infraestructura ferroviaria gestionada por Adif, cuya infraestructura es utilizada por operadores ferroviarios como Renfe. El proceso metodológico ha incluido una etapa inicial de diagnóstico orientada a identificar las principales causas asociadas a la detección tardía de fallos en la infraestructura ferroviaria.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis del proceso actual de mantenimiento, con el objetivo de identificar oportunidades de mejora relacionadas con el monitoreo y detección temprana de incidencias. A partir de este diagnóstico, se ha desarrollado una propuesta de

mejora basada en el uso de inteligencia artificial y herramientas de análisis de datos, orientadas al mantenimiento predictivo.

Finalmente, se definieron los lineamientos para la implementación de la propuesta, considerando los elementos necesarios para su integración dentro del proceso de mantenimiento de la organización. Este enfoque permitió estructurar el proyecto de manera progresiva, pasando del análisis del problema a la formulación de una solución viable, orientada a mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema ferroviario.

Identificación y Análisis del Problema

En la primera etapa, se realizó un análisis exhaustivo de la organización y del contexto en el cual se desarrolla el proceso afectado. Se documentó el problema identificando sus causas raíz, efectos y puntos críticos que afectan el desempeño del proceso. Este diagnóstico inicial fue esencial para estructurar la solución y asegurar que la intervención respondiera de manera precisa a las necesidades de la organización.

Para el diagnóstico de la problemática se ha empleado un enfoque de análisis causa-raíz, apoyándonos de recabar información pública y documentos sobre el sistema ferroviario de España. A lo largo del proceso de diagnóstico, se analizaron reportes institucionales, informes del sector ferroviario, y noticias que estuvieran directamente relacionadas con incidencias en la infraestructura ferroviaria. A partir de esta información se pudo identificar los principales factores que están asociados al problema, tales como son el incremento de tráfico ferroviario, el envejecimiento de infraestructura, así como las limitantes y carencias en el mantenimiento preventivo.

Este análisis ha permitido identificar claramente los puntos críticos que hay dentro del proceso de mantenimiento de la infraestructura que gestiona Adif, y de igual forma los efectos que generan estas incidencias en la operación del sistema ferroviario, que es utilizado por operadores, como Renfe.

Planificación de la Solución

En la segunda etapa, se desarrolló un plan de acción detallado que incluyó la definición de objetivos específicos y una secuencia de actividades que permitiría mitigar o resolver el problema identificado. Esta fase incluyó el diseño de una estrategia de ejecución organizada y estructurada que facilitara el logro de los objetivos propuestos y maximizará la eficiencia del proceso intervenido. La planificación detallada de actividades y recursos fue clave para asegurar una implementación precisa y efectiva.

Definición de Alcance y Recursos. La tercera etapa se enfocó en delimitar el alcance de la intervención y los recursos necesarios. Se establecieron responsables para cada actividad, y se elaboró un cronograma de ejecución para controlar el avance de la implementación. Asimismo, se desarrolló un presupuesto que detalla los costos asociados a cada fase, permitiendo optimizar la asignación de recursos. Esta fase aseguró que todas las variables críticas estuvieran alineadas para una ejecución sin interrupciones.

Identificación y descripción un problema al interior de la organización

El sistema ferroviario español es una red gestionada por Adif (Encargada del mantenimiento de la infraestructura) y operada por Renfe. La red se divide en dos pilares fundamentales:

- **Red de alta velocidad:** La red de alta velocidad española cuenta en 2026 con más de 4.300 km, siendo la primera línea de Europa y actualmente la línea más extensa del continente europeo y la segunda en el mundo por detrás de China. El sistema transporta cerca de 40 millones de pasajeros a velocidades superiores a los 300 km/h, conectando las principales ciudades españolas. Toda la alta velocidad en España puede organizarse en torno a dos zonas: norte y sur. Cada uno de ellos articula distintas regiones del país y desempeña un papel clave en la vertebración del territorio, conectando capitales de provincia con zonas periféricas y áreas en desarrollo.

- **Cercanías:** El sistema de Cercanías en España es la red de transporte ferroviario suburbano que conecta las principales ciudades con sus áreas metropolitanas, moviendo a más de 450 millones de viajeros al año en núcleos como Madrid, Barcelona (Rodalies), Valencia, Bilbao y Sevilla.

La red ferroviaria española ha atravesado una década crítica (2015-2025) marcada por problemas estructurales, inversiones insuficientes y una crisis operativa sin precedentes. Aunque España mantiene la segunda red de alta velocidad más extensa de Europa, presenta una densidad de tráfico 5.5 veces inferior a Francia y una intensidad de uso de apenas el 35.3% frente al 53% de media europea.

Desde 2025 se han venido produciendo incidencias que afectan a los tres operadores (Renfe, Ouigo, Iryo). Algunos ejemplos son los retrasos en los trenes AVE, los robos de cable o las caídas de tensión en catenarias de vías de alta frecuencia y, el peor y más reciente, descarrilamiento y choque de Ademuz (Córdoba).

Los problemas observados en dicha red ferroviaria, pueden ser explicados a partir de diversos factores estructurales que tienen interacción entre sí, y que están contribuyendo al deterioro del servicio.

- **Aumento del tráfico tras la liberalización del sector:** La liberalización de la alta velocidad llegó a finales de 2020 con la trasposición hispánica del llamado Cuarto Paquete Ferroviario, que obliga a los Estados miembro de la Unión Europea a liberalizar el sector, como ya se hizo con el transporte de mercancías por ferrocarril. Esta liberalización ha transformado el sector ferroviario con la entrada de competidores como Iryo y Ouigo, produciendo un incremento de frecuencias que ha intensificado el uso de la red y desgaste de las infraestructuras críticas.
- **Envejecimiento y averías de la infraestructura:** Las líneas más antiguas, como por ejemplo la de Madrid-Sevilla, construida en 1992 y con más de 30 años de servicio,

exigen un mantenimiento exhaustivo y una inversión significativa en la renovación de la vía, la señalización y el mantenimiento de las catenarias.

- **Falta de mantenimiento e inversión de la infraestructura:** Debido a la falta de mantenimiento y a la baja inversión se produce fallos importantes que afectan a la calidad del servicio ,por ejemplo, en la red de cercanías de la comunidad de Madrid las incidencias se han multiplicado por cuatro en los últimos seis años, con una cifra récord de 1.521 en 2025 con trenes descarrilados, convoyes a oscuras y andenes saturados.Las demoras, impiden llegar a tiempo tanto al trabajo como a clase. Además,los usuarios afirman que los trenes pasan con menos frecuencia y que, en algunas ocasiones, directamente no aparecen.
- **Limitaciones de velocidad:** Tras el último accidente en Adamuz (Córdoba) que dejó 45 víctimas mortales y numerosos heridos,ha provocado la puesta en marcha de límites temporales a la velocidad (LTV) que establece Adif como medida preventiva por la cual se limita la velocidad media (300 kilómetros por hora) en los tramos donde hay algún riesgo detectado.Esto, evidentemente, tiene un efecto indeseado en los tiempos, porque los trayectos se dilatan y la frecuencia de los trenes se ve alterada.

Estas incidencias registradas en la red ferroviaria española se pueden explicar por varios factores que están relacionados entre sí. Principalmente, la liberalización del sector ferroviario en el año 2020 incrementó el tráfico de red por la entrada de nuevos operadores, por ejemplo Iryo y Ouigo, y con ello se ha intensificado el uso de la infraestructura existente.

Adicionalmente, el envejecimiento de determinadas líneas, como por ejemplo el tramo de Madrid-Sevilla que se inauguró en 1992, requiere mayores labores de mantenimiento y renovación de componentes, como la vía, la señalización y las catenarias.

Al mismo tiempo, es importante mencionar que diversos informes y registros operativos muestran un aumento de incidencias en los últimos años. especialmente en redes de cercanías como Madrid, donde han sido reportadas más de 1500 incidencias tan solo en 2025. En estas

situaciones se han incluido averías técnicas, retrasos y fallos en sistemas eléctricos que afectan en gran medida la puntualidad del servicio. Por último, es importante también resaltar que algunos de los accidentes recientes han provocado que se implementen limitaciones temporales de velocidad en tramos determinados, esto como medida de prevención, lo que perjudica bastante a los tiempos de viaje y frecuencia de circulación de trenes.

Descripción de la empresa a intervenir

Para el desarrollo de esta estrategia, se ha considerado el sistema ferroviario español como un ecosistema compuesto por dos empresas públicas principales que en conjunto gestionan la infraestructura y la operación del transporte ferroviario. Por un lado, Adif (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias), es la empresa encargada de la gestión de vías, estaciones y seguridad, así como su mantenimiento. Por otro lado, Renfe es la principal operadora ferroviaria del país, que se encarga de la prestación del servicio de transporte, tanto de pasajeros como de mercancías. Ambas entidades son dependientes del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, y desempeñan un papel clave en el correcto funcionamiento del sistema ferroviario de la nación.

Misión

La misión del sistema ferroviario español se sustenta en la colaboración estratégica entre el administrador de la infraestructura (Adif) y el operador de servicios (Renfe). Ambas entidades, alineadas con los estándares internacionales de sostenibilidad y excelencia operativa.

Adif: Pilar de Infraestructuras Críticas y Sostenibles. La misión de la organización, alineada con los estándares internacionales de sostenibilidad y excelencia operativa, se define a través de tres pilares fundamentales que sustentan el desarrollo del sistema ferroviario español.

- **Resiliencia y Fiabilidad:** Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo hincapié en el acceso asequible y equitativo.
- **Modernización Tecnológica:** 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.
- **Seguridad y Accesibilidad:** 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 especialmente atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad.

Renfe: Prestación y Excelencia en el Transporte. El objeto de la entidad pública empresarial RENFE-Operadora es la prestación de servicios de transporte ferroviario, tanto de viajeros como de mercancías, que incluirá el mantenimiento de material rodante, y de otros servicios o actividades complementarias o vinculadas al transporte ferroviario.

Visión

La visión de este proyecto se fundamenta en la convergencia de los planes estratégicos de Adif y Renfe, orientados a consolidar un modelo ferroviario que lidere la transición digital y ecológica en España y en el mercado internacional.

Adif: Liderazgo en Infraestructuras Inteligentes y Resilientes. Adif se enfocará en ser un referente como organización focalizada en la gestión de infraestructuras

resilientes, sostenibles, seguras e inteligentes que contribuyan al nuevo modelo de transición ecológica.

- **Descarbonización y Sostenibilidad:** Alcanzar la emisión neta cero de gases de efecto invernadero para el año 2050, liderando la transición energética en el transporte nacional.
- **Impacto Social e Inclusión:** Configurar iniciativas estratégicas que integren el apoyo a la inclusión, igualdad, la diversidad y la eliminación de cualquier forma de discriminación
- **Cohesión Territorial:** Trabajo hacia la cohesión social y territorial donde Adif y Adif AV son un máximo exponente dando lugar a la vertebración de los territorios y a la inclusión social de los mismos
- **Gobernanza y Ética:** La Operación bajo los estándares más altos de gobierno corporativo, transparencia, divulgación y gestión de riesgos empresariales, ambientales y sociales que se enfrentan cada día con el desarrollo del negocio y el servicio.

Renfe : Referente Global en Operación y Vanguardia Tecnológica. Por su parte, la visión de Renfe se orienta a la excelencia competitiva en un mercado liberalizado.

- **Liderar el mercado de los servicios de alta velocidad ya liberalizados:**
Mejora de la oferta de Renfe en el mercado de larga distancia. Renfe va a reestructurar este negocio, sobre la base de la innovación y la digitalización, para consolidarse como el operador líder y ganar cuota de mercado y con el objetivo de convertirse en referente del sector para los clientes.
- **Consolidar Renfe Mercancías como un operador logístico integral:** la compañía va a profundizar en un modelo de gestión que mejore el equilibrio financiero y asegure la sostenibilidad futura de la actividad y la creciente confianza de los clientes en la oferta de Renfe.

- **Transformar Renfe Ingeniería y Mantenimiento:** Mejorar todos sus procesos de Producción, utilizando como palanca básica la digitalización. La recepción de nuevos trenes en alta velocidad y en los Servicios Públicos, todos ellos dotados de última tecnología, debe servir de palanca para reestructurar el área industrial de Renfe, un área que tiene presencia en todo el territorio peninsular, que genera empleo directo e indirecto y que tiene conexión directa con los proyectos más innovadores de los fabricantes de trenes en España.
- **Incrementar la presencia de Renfe en otros mercados en todo el mundo:**
Aprovechando procesos de liberalización ferroviaria tanto en los servicios de larga distancia como en servicios públicos de cercanías. Renfe ha lanzado nuevos proyectos en Europa Central y en América. Cara al Plan Renfe28, la compañía va a profundizar en este modelo de gestión para incrementar el volumen de negocio y ser referente en otros países en todo el mundo, tanto en líneas de larga distancia como en servicios públicos que puedan lanzar a licitación las autoridades regionales titulares de los mismos.

Mapa de procesos

Como se mencionó anteriormente, el sistema ferroviario Español está estructurado en torno a dos entidades principales: Renfe, quien es responsable de la operación de los servicios ferroviarios, y Adif, que se encarga de la gestión de la infraestructura ferroviaria.

Al mismo tiempo, Adif se divide en Adif y Adif Alta Velocidad. Adif es quien gestiona el mantenimiento de la red ferroviaria convencional, mientras que Adif Alta Velocidad es quien se encarga de la construcción y mantenimiento de la infraestructura de la alta velocidad.

Esta estructura organizacional permite diferenciar con claridad tanto los procesos relacionados con la gestión de infraestructura ferroviaria (Adif), así como los procesos que se vinculan directamente con la operación del servicio ferroviario (Renfe).

A partir de esta estructura, el sistema puede ser representado mediante el siguiente mapa de procesos.

Procesos estratégicos. Estos son los procesos responsables de la planificación, dirección, y toma de decisiones del sistema ferroviario.

- Planificación estratégica del transporte ferroviario.
- Gestión de políticas de movilidad y sostenibilidad.
- Gobernanza y regulación del sistema ferroviario.
- Gestión de inversiones en infraestructura y material rodante.

Procesos operativos. Estos procesos son los que están directamente relacionados con la prestación de los servicios ferroviarios. A su vez, se subdivide en dos áreas importantes: operación ferroviaria, la cual es llevada por Renfe, y gestión de infraestructura, la cual es llevada por Adif.

Operación ferroviaria (Renfe)

- Gestión de servicios de transporte de pasajeros.
- Operación de trenes de larga distancia y alta velocidad.
- Operación de trenes regionales y cercanías.
- Gestión de transporte de mercancías.
- Atención al cliente y gestión de incidencias.

Gestión de infraestructura (Adif)

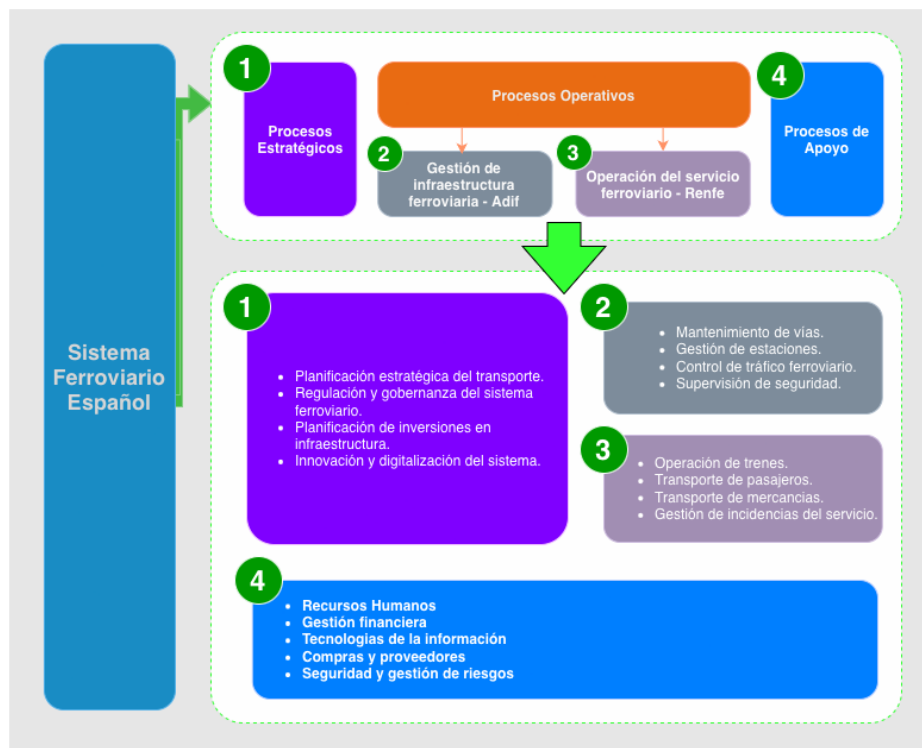
- Gestión y control de circulación ferroviaria.
- Mantenimiento de vías e infraestructura ferroviaria.
- Gestión de estaciones ferroviarias.

- Gestión de la capacidad de red ferroviaria.
- Supervisión de seguridad en la infraestructura.

Procesos de Apoyo. En estos procesos se proporcionan los recursos, las herramientas, y el soporte organizacional que son necesarios para el correcto funcionamiento de los procesos estratégicos y operativos. Se puede decir que no participan directamente en la prestación del servicio de transporte, pero su papel es fundamental debido a que facilita la gestión de recursos humanos, así como la administración financiera y tecnológica, la gestión de compras y proveedores, y la seguridad y soporte administrativo. Estos procesos están contribuyendo a garantizar la continuidad operativa, al igual que eficiencia organizacional y cumplimiento de objetivos institucionales, y por estas razones se toman en cuenta también.

Figura 1.

Mapa de procesos del sistema ferroviario español, incluyendo procesos estratégicos, operativos y de apoyo.



Nota. Elaboración propia con base en información de Adif (2024) y Renfe (2024).

Descripción del proceso a intervenir

El mantenimiento de las vías en Adif recae principalmente en la Dirección de Conservación y Mantenimiento, dentro de la infraestructura ferroviaria, y es ejecutado por el personal de infraestructura y vía. Esta dirección está involucrada en proyectos de gran envergadura, entre ellos, la renovación integral de la primera línea de alta velocidad (LAV Madrid-Sevilla) y el Canal de Acceso en Valencia.

Sus equipos gestionan también ámbitos como la auscultación de sistemas e instalaciones y la conservación y mejora de los subsistemas ferroviarios. La Dirección General de Conservación y Mantenimiento realiza las siguientes funciones:

- Mantenimiento y obras de raíles, traviesas, balastos y desvíos.
- Se encarga de suministrar energía a las catenarias que alimentan a los trenes.
- Gestiona la red de semáforos inteligentes, balizas y sistemas de frenado automático.
- También gestiona la red de fibra óptica y radio que permite la comunicación entre el tren y la vía.

La Dirección General de Conservación y Mantenimiento es un área estratégica que contribuye a la operatividad de la red ferroviaria en condiciones óptimas, maximizando su disponibilidad y prestaciones en un contexto de creciente demanda de tráfico y viajeros.

Entre los retos más relevantes que afronta se encuentran la renovación de líneas convencionales, con especial protagonismo de los planes de Cercanías; el mantenimiento de la capacidad de respuesta ante incidencias; el refuerzo de un modelo de mantenimiento predictivo con el uso de tecnologías disruptivas; y la dotación de más resiliencia a las infraestructuras frente a los efectos del cambio climático.

Descripción del problema que presenta el proceso

El sistema ferroviario de España depende de una gestión adecuada, así como un mantenimiento de infraestructura para garantizar así la seguridad y calidad del servicio, así

como la continuidad del mismo. Dentro de este contexto, encontramos que uno de los procesos más críticos recae en el mantenimiento de la infraestructura ferroviaria, que como se mencionó anteriormente, es responsabilidad de Adif, por otro lado, la operación de los servicios ferroviarios corresponde principalmente a Renfe y otros operadores que utilizan la red.

A lo largo de los últimos años, hemos podido observar un aumento significativo en incidencias, incidencias que se relacionan directamente con la infraestructura ferroviaria, dichas incidencias como fallos en catenarias, deterioro de las vías, robos a cableado, limitaciones temporales impuestas a la velocidad, y retrasos operativos. Cabe mencionar que estas situaciones afectan principalmente a los servicios de velocidad y cercanías, y estos dan como resultado un gran impacto negativo en disponibilidad y puntualidad y por tanto, en la calidad del servicio que se le ofrece a los usuarios.

Hay diversos factores que en conjunto están contribuyendo a esta problemática. Podemos destacar el envejecimiento de gran parte de la infraestructura ferroviaria, el incremento en el tráfico ferroviario, así como las limitaciones de las actividades de mantenimiento preventivo. Como consecuencia de estos factores, algunos de los fallos en la infraestructura son detectados únicamente cuando ya han ocasionado problemas o incidencias operativas, provocando así retrasos, servicio interrumpido, y sobre todo, mayores costos de reparación de daños.

Partiendo de este escenario y serie de factores, deja al descubierto que existe una necesidad de mejorar los mecanismos de monitoreo y mantenimiento de la infraestructura. Adicionalmente, la falta de herramientas de análisis predictivo que permitan anticiparse ante los fallos potencialmente peligrosos, limita la capacidad de intervenir tempranamente y con ello aumentando el riesgo de incidencia que impacta directamente al desempeño del sistema ferroviario en términos de eficiencia, confiabilidad del servicio, pero sobretodo en la seguridad del mismo.

Establecimiento de planes de acción para la solución del problema

Con base al diagnóstico realizado sobre el proceso de mantenimiento de la infraestructura ferroviaria, se está planteando un plan de acción orientado a mejorar la detección temprana y oportuna en fallos y fortalecimiento de la eficiencia operativo del sistema ferroviario español. Este plan de estructura es una serie de etapas que nos permiten definir los objetivo de la inversión, Asimismo, se identifican los recursos que son requeridos para poder llevar a cabo la ejecución de la propuesta dentro del contexto organizacional de Adif, donde su infraestructura es utilizada por Renfe y otros operadores.

Establecimiento de objetivos

- **Reducir el número de incidencias en la infraestructura:** Reducir en un 15% el número relacionadas con la incidencias en la infraestructura ferroviaria y el material rodante mediante la mejora de los procesos de monitoreo y mantenimiento en un plazo de 12 meses.
- **Incremento del monitoreo de la infraestructura:** Aumentar la frecuencia de análisis y supervisión de la infraestructura ferroviaria, mediante el uso de trenes auscultadores y la adecuación de trenes comerciales equipados con sistemas de monitoreo, permitiendo realizar evaluaciones continuas y de mayor periodicidad en comparación con los métodos de inspección tradicionales.
- **Reducción costes de mantenimiento:** Disminuir en un 10% los costes asociados al mantenimiento de la infraestructura ferroviaria mediante la optimización de las actividades de mantenimiento y la incorporación de herramientas de análisis predictivo en un periodo de 12 meses.
- **Mejorar la capacidad de diagnóstico:** Reducir en un 30% el tiempo medio de diagnóstico de incidencias mediante la utilización de herramientas basadas en

inteligencia artificial que faciliten la identificación temprana de posibles fallos en la infraestructura.

- **Mejorar la comunicación operativa:** Fortalecer la comunicación y coordinación entre las áreas técnicas responsables de la infraestructura y de la operación ferroviaria, mediante la centralización de la información de incidencias y datos técnicos en una plataforma compartida entre Adif y Renfe.
- **Incremento en la disponibilidad de trenes:** Aumentar en un 10% la disponibilidad operativa de los trenes, reduciendo las bajas derivadas de averías imprevistas mediante una mejora en la planificación del mantenimiento y la detección temprana de fallos.
- **Reducción de retrasos por fallos técnicos:** Disminuir en un 20% los minutos de retraso acumulados anualmente ocasionados por incidentes técnicos en ruta, mediante la mejora de los procesos de diagnóstico y mantenimiento de la infraestructura ferroviaria.
- **Optimización de vida útil de los componentes:** Optimizar en un 15% el ciclo de vida de los componentes críticos de la infraestructura, utilizando modelos de análisis predictivo que permitan programar su sustitución en función de su estado real y proximidad de los límites de seguridad, en lugar de basarse únicamente en calendarios de mantenimiento predictivo.

Descripción de la solución

La solución propuesta para mejorar el proceso de mantenimiento ferroviario se centra en dos áreas principales del sistema: el mantenimiento de la infraestructura y el mantenimiento de la infraestructura y el mantenimiento del material rodante. Ambos elementos son fundamentales para garantizar la seguridad, la continuidad del servicio y la eficiencia operativa del sistema ferroviario. Por ello, la propuesta plantea una estrategia que permita optimizar la supervisión del

estado de las vías, así como mejorar la detección temprana de los fallos en los trenes mediante el uso de tecnologías de monitoreo y análisis de datos.

En relación al mantenimiento de la infraestructura, Adif ya tiene a su disposición herramientas destinadas al análisis y la predicción de averías, entre las que destacan los trenes de auscultación. Estos vehículos especializados funcionan como laboratorios sobre rieles, teniendo como objetivo verificar el estado de la infraestructura ferroviaria, incluyendo tanto las vías, así como el sistema de catenaria, con el fin de garantizar la seguridad de la red. Su función principal consiste en realizar diagnósticos técnicos detallados, que permitan detectar desgastes, irregularidades o anomalías antes de que puedan representar un riesgo para la operación ferroviaria. Gracias a estas capacidades, los trenes de auscultación desempeñan un papel fundamental tanto en la puesta en servicio de las líneas de alta velocidad como en el mantenimiento y supervisión de las infraestructuras ya existentes en España.

El funcionamiento de un tren auscultador puede compararse con el de un sistema de un escáner médico. Durante la circulación, estos trenes pueden operar a velocidades que alcanzan los 300 km/h mientras analizan de forma continua diversos parámetros críticos relacionados con el estado de la red ferroviaria. A través de sensores y equipos de medición especializados, los trenes recopilan información que es crucial e importante para una oportuna evaluación de distintos elementos de la infraestructura, entre los que destacan:

- **Geometría de la vía:** medición de parámetros como la distancia entre raíles, la alineación y la inclinación de la vía.
- **Estado de la catenaria:** análisis del sistema de cableado eléctrico encargado de suministrar energía a los trenes.
- **Sistemas de señalización:** verificación del correcto funcionamiento de sistemas de seguridad ferroviaria, como ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático) o ERTMS (European Rail Traffic Management System), fundamentales para la gestión segura del tráfico ferroviario.

Actualmente Adif dispone de seis vehículos operativos destinados a la auscultación de la red ferroviaria. Entre ellos se encuentran tres trenes de última generación, los cuales son fabricados por Stadler Rail, diseñados específicamente para la inspección de vía y catenaria. De estos vehículos, dos están destinados a líneas de ancho ibérico correspondientes a la red convencional y uno a líneas de ancho estándar utilizadas en los corredores de alta velocidad. La inversión realizada para la adquisición de estos trenes asciende aproximadamente a 79,8 millones de euros. Estos sistemas de inspección se utilizan principalmente en líneas de alta velocidad, así como en tramos de red convencional y servicios de cercanías, donde permiten realizar evaluaciones técnicas periódicas del estado de la infraestructura ferroviaria.

Esta tecnología no solo es usada por Adif, si no que también hay más países que cuentan con métodos para la revisión de sus redes ferroviarias, como en Japón. Por ejemplo, Japón ha tenido dos trenes conocidos como “Doctor Yellow” que circulan por las infraestructuras para determinar si hay fallos. Uno ya fue retirado en enero de 2025 y el otro será retirado en 2027 para ser sustituido por trenes de pasajeros equipados con herramientas de inspección para revisar las vías durante sus recorridos.

Gracias a la implementación en Japón de sustituir los trenes encargados del análisis de la infraestructura, la idea a implementar en el caso Español sería instalar sensores en los trenes comerciales de Renfe que circulan a diario. En vez de depender de unos pocos trenes donde el mantenimiento, el uso y la compra cuentan millones y únicamente pasan cada pocos meses para comprobar la situación de la infraestructura, lo que intentamos es convertir los trenes comerciales en trenes auscultadores para tener un análisis del estado de las vías y de las infraestructuras de forma diaria, para comprender y analizar el estado de salud de la infraestructura y poder encontrar o prevenir posibles desperfectos que provoquen futuros contratiempos o en el peor de los casos accidentes como en el de Adamuz.

El plan es que en vez de esperar que un tren de auscultador de adif pase, lo ideal sería tener información del estado de los materiales de forma diaria gracias a la instalación de sensores inteligentes en los trenes de pasajeros .Ahora ,en la mayoría de los casos si un defecto aparece entre medias,no se detecta hasta que se produce la avería.Con esta idea se busca actuar antes de que se produzca algún defecto gracias a los análisis diarios.

Una vez definida la capacidad de los trenes comerciales para actuar como sensores de la infraestructura, es necesario extender esta idea dentro de los trenes. En este sentido, la solución pasa por la auscultación de la infraestructura hacia el Mantenimiento Basado en la Condición (CBM).

El mantenimiento basado en la condición (CBM) es una estrategia de mantenimiento preventivo que se fundamenta en el monitoreo continuo del estado de los activos o equipos con el objetivo de determinar el momento más adecuado para realizar intervenciones de mantenimiento. Este enfoque utiliza sensores y otros sistemas de supervisión para recopilar información sobre el rendimiento y comportamiento de los equipos durante su operación. Posteriormente, los datos obtenidos son analizados mediante algoritmos, técnicas de aprendizaje automático y herramientas de inteligencia artificial, lo que permite identificar patrones, tendencias o anomalías que podrían indicar la aparición de un posible problema de mantenimiento.

En lugar de aplicar un modelo de mantenimiento basado únicamente en Kilómetros recorridos o intervalos de tiempo predefinidos, esta propuesta plantea evolucionar hacia un sistema basado en la condición y posteriormente, hacia un enfoque predictivo. La implementación de un sistema CBM (Condition-Based Maintenance) permite anticipar posibles fallos y realizar intervenciones antes de que se produzca una avería o que algún componente del tren quede inutilizado. Mediante la instalación de sensores en los trenes, es posible supervisar de forma continua el comportamiento de distintos sistemas y detectar señales de degradación o disminución del rendimiento de determinados componentes. A través del análisis

de estos datos, los sistemas de inteligencia artificial pueden evaluar en tiempo real el estado de los elementos críticos del tren. Cuando los indicadores calculados se encuentran fuera de los rangos establecidos, el sistema genera automáticamente una alerta que informa al maquinista o al personal de mantenimiento sobre la posible necesidad de revisar o reparar un componente específico. Gracias a la implementación del sistema CBM, es posible obtener diversos beneficios operativos, entre los cuales destacan los siguientes:

- **Optimiza los mantenimientos de sustitución por fin de ciclo:** Normalmente los indicadores de vida se definen en kilómetros recorridos u horas de funcionamiento del tren, mientras que los indicadores de CBM apuntan un valor más preciso que permite alargar la sustitución de los equipos al momento en el que realmente se alcanza su límite.
- **Extienden la vida útil de la flota:** en caso de producirse un fallo, se va a detectar antes de que suponga una amenaza a la operatividad del tren.
- **Optimiza las tareas de mantenimiento:** Al monitorizar los fallos que puede ocasionarse en la flota, los talleres pueden reparar directamente los equipos defectuosos.

En conclusión, para encontrar una solución a los elevados costes de mantenimiento la idea principal es la instalación de diferentes sensores que cumplan con determinadas funciones . Por un lado, tenemos la función mediante la auscultación con los trenes de pasajeros y por otro los encargados de informar a Adif sobre el estado de la infraestructura y mediante un sistema CBM.

Secuencia de actividades para ejecución de la solución

Preparación (Meses 1-3)

- **Selección de piloto y adecuación de la infraestructura:** Se selecciona una línea para la prueba piloto, por ejemplo, en el corredor más antiguo de la línea de Alta velocidad (Sevilla-Madrid) y en la red de Cercanías del núcleo de Sevilla.
- **Instalación y ajuste de sensores:** Colocación de acelerómetros, GPS de alta precisión y sensores de temperaturas en los bogies y puertas en varias unidades comerciales.
- **Creación de la infraestructura:** Se configura la infraestructura en la nube para recibir los datos masivos que enviarán los trenes en tiempo real.
- **Entrenamiento modelos IA:** Se alimentará a los modelos la de datos de averías pasadas en el material móvil y de los registros de los trenes auscultadores de Adif para que los modelos sepan cuando la infraestructura está bien o mal, o para detectar la salud de los materiales de los vehículos móviles.

Proyecto piloto (Meses 4-8)

- **Creación de Herramientas:** Lanzamiento de una herramienta App o web en los lugares donde se estén realizando las pruebas piloto para que los técnicos de mantenimiento de Adif y Renfe reciban las alertas generadas por la IA y también visualice el estado en tiempo real de la infraestructura y los trenes.
- **Pruebas en campo:** Los equipos de mantenimiento de Renfe y Adif revisan las alertas de fallos generados por la IA para confirmar su precisión.
- **Evaluación y ajustes del piloto:** Estudio y medición del nivel de precisión de los sistemas de IA.

Escalado y despliegue (Meses +9)

- **Despliegue, creación de modelos digitales e integración progresiva:** Extensión de los sensores a toda la flota de trenes de las líneas de Alta velocidad, núcleos de cercanías y redes de media distancia. Implementación de gemelos digitales de cada tren en uso y de la infraestructura.
- **Capacitación:** Creación de cursos o talleres de capacitación para la formación masiva de técnicos y maquinistas en interpretación de alertas IA.
- **FeedBack en tiempo real:** Creación de canales de soporte técnico para las incidencias relacionadas con los nuevos sistemas de Inteligencia Artificial.

Optimización y Evaluación Continua(1-2 años)

- **Auditoria de impacto:** Informe final del estado de las infraestructuras y trenes, nivel de retazos e incidencias y niveles de satisfacción ciudadanos por el servicio prestado después de la implementación de los sistemas IA.

Descripción de recursos necesarios para la ejecución de la solución

Para la implementación de la solución propuesta es necesario disponer de una serie de recursos tecnológicos, humanos y organizativos que permitan llevar a cabo la recolección, procesamiento y análisis de los datos generados por los sistemas de monitoreo instalados en los trenes. Estos recursos permiten garantizar el funcionamiento del sistema de mantenimiento basado en condición así como la correcta integración de las herramientas de análisis y supervisión dentro de operaciones ferroviarias.

Para poder transformar los trenes comerciales en trenes de auscultación, es necesario invertir en determinados sensores para la medición. Los dispositivos de medición son una de las partes más importantes, porque con ellos podremos mapear al detalle la situación de las

vías, el estado de las catenarias y el monitoreo de los trenes en tiempo real. Es de vital importancia instalar en el material rodante los siguientes sensores:

- **Sensores:** Los trenes estarán equipados con acelerómetros de alta precisión, giroscopios para medir las vibraciones en los bogies y la geometría de las vías. Con ellos podremos monitorear la temperatura, vibraciones y desgastes.
- **Sistemas de posicionamiento GPS de alta precisión:** Proporcionan la posición exacta, velocidad y dirección de los trenes.
- **Dispositivos de Captura de Datos:** Pequeños ordenadores industriales instalados en el tren para procesar los datos de los sensores antes de enviarlos.
- **Módems de Comunicación 5G/GPRS:** Para la transmisión inalámbrica y constante de datos desde el tren en movimiento a los servidores centrales.

En cuanto a la infraestructura, es necesario tener servidores escalables para almacenar y procesar la información generados en tiempo real, así como su análisis, procesamiento.

Para que los técnicos puedan interactuar con los sistemas de inteligencia artificial será necesario la creación de herramientas de visualización como aplicaciones web o multiplataforma para que los técnicos y operarios puedan visualizar las alertas generadas por los sistemas IA. Estas herramientas también contendrán mapas interactivos para poder estudiar y analizar la salud de los trenes e infraestructuras, localización del material móvil y fallos detectados en tiempo real.

Por último y lo más importante, tener una arquitectura de IA, modelos configurados y entrenados y enfocados en la predicción de fallos de la infraestructura y material móvil.

Para tener éxito es importante la colaboración entre los expertos de las compañías para una implementación exitosa de los sistemas IA. Los recursos y el talento humano es de vital importancia porque serán los encargados de validar las alertas que envíe la IA para comprobar que tengan sentido técnico y físico. Habrá un equipo de científicos de datos y arquitectos de inteligencia artificial responsables del entrenamiento de la IA para asegurar principalmente que

se cumplan todos los estándares de calidad y de asegurar que la IA no produce alucinaciones en sus alertas. También serán responsables de recoger el feedback de los técnicos y operarios de las compañías para la mejora continua de los sistemas IA.

Como Adif se encarga principalmente de la recopilación de datos para detectar fallos y su posterior mantenimiento en la infraestructuras, el personal de talleres de Renfe serán los especializados en mantener y actualizar los sensores que sean instalados en cada tren. así como también de solucionar cualquier fallo que se detecte en los trenes.

Con base a los elementos descritos anteriormente, la siguiente tabla resume los principales recursos tecnológicos y humanos necesarios para la implementación del sistema de monitoreo y mantenimiento basado en condición propuesto.

Tabla 1.

Recursos necesarios para implementación del sistema.

Tipo de recurso	Descripción	Función
Sensores ferroviarios	Acelerómetro, giroscopios, sensores de temperatura	Monitoreo de vibraciones y desgastes.
Sistemas de posicionamiento	GPS de alta precisión	Ubicación exacta de las mediciones
Dispositivos de captura de datos	Ordenadores industriales	Procesamiento inicial de datos
Sistemas de comunicación	Módem 5G/GPRS	Transmisión de datos en tiempo real
Infraestructura de servidores	Servidores escalables	Almacenamiento y procesamiento de datos
Plataformas de visualización	Aplicaciones web o software técnico	Visualización de alertas y estado de la red
Sistemas de IA	Modelos predictivos	Identificación de anomalías y fallos
Recursos humanos	Ingenieros, técnicos y científicos de datos	Supervisión y mejora del sistema.

Nota. Elaboración propia.

En conjunto, estos recursos tecnológicos, humanos y organizacionales contribuyen a la base necesaria para la implementación del sistema de monitoreo y mantenimiento predictivo

propuesto. Su correcta integración permitirá mejorar la capacidad de detección temprana y oportuna en fallos y optimizar las actividades de mantenimiento dentro del sistema ferroviario.

Definición del alcance de la solución, partes interesadas, cronograma y presupuestos.

En esta sección se presenta la planificación necesaria para la implementación de la solución que se propone, definiendo su alcance, las partes involucradas, y los elementos clave para una correcta ejecución. También se establecen los límites del proyecto, así como resultados esperados en relación a la mejora del proceso de mantenimiento ferroviario. De igual forma, se identifican los responsables de las actividades y se estructura un cronograma de trabajo, y se estima el presupuesto requerido, con la finalidad de garantizar una implementación organizada, viable y alineada con las necesidades operativas de Adif y Renfe.

Alcance final de la solución

El alcance de la presente resolución se centra en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y mantenimiento que se basa en condición, orientado a mejorar la detección temprana de fallos en infraestructura ferroviaria y en material rodante. La solución abarca en conjunto la infraestructura gestionada por Adif y los trenes operados por Renfe, con el objetivo de optimizar procesos de mantenimiento y reducción de incidencias operativas.

En términos funcionales, el sistema contempla la instalación de sensores en trenes comerciales para una transformación en plataformas de monitoreo continuo, permitiendo recopilar datos sobre el estado de las vías, la catenaria y los sistemas críticos del material rodante sin necesidad de interrumpir operaciones ferroviarias. De la misma manera, se incluye el desarrollo de una plataforma tecnológica capaz de procesar y analizar los datos en tiempo real mediante modelos de inteligencia artificial, facilitando la detección de anomalías, la generación de alertas, y el apoyo en la toma de decisiones en los procesos de mantenimiento.

Desde un punto de vista de operación, la solución se limita a la red de alta velocidad y los servicios de cercanías en núcleos urbanos, en donde observamos la mayor demanda y puntos críticos del sistema ferroviario. La instalación de sensores se realiza exclusivamente en trenes operados por Renfe, sin consideración para esta fase, la integración con otros operadores ferroviarios presentes en el mercado.

Con este contexto, el sistema propuesto tiene un carácter complementario y de apoyo a la operación, por lo cual no se sustituye las inspecciones físicas ni las actividades de mantenimiento realizadas por el personal técnico. La función principal es proporcionar información predictiva y diagnóstica, que permita así optimizar la planeación y su ejecución de dichas actividades.

Finalmente, quedan fuera del alcance de esta solución que se propone elementos como estaciones, pasos a nivel y túneles centrando la inversión exclusivamente en los componentes críticos de la infraestructura ferroviaria, como las vías y la catenaria, así como los sistemas de material rodante.

Identificación de responsables de las actividades para ejecución

La implementación de la solución que se propone requiere una asignación clara de responsabilidades entre las distintas áreas que se involucran, esto con el fin de garantizar una ejecución coordinada y eficiente del sistema de mantenimiento basado en condición. Por ello, se han identificado los principales departamentos responsables dentro de la organización, definiendo sus funciones en relación con las distintas fases del proyecto.

Teniendo esto en cuenta, las responsabilidades se distribuyen de la siguiente manera:

- **Dirección general de conservación y mantenimiento:** responsable de la supervisión operativa del sistema y del análisis y validación de las alertas que se generan por los

métodos de inteligencia artificial. Este departamento coordina las acciones correctivas necesarias sobre la infraestructura y material rodante.

- **Dirección general de planificación estratégica y proyectos:** encargada de la planificación, seguimiento y control de proyecto. Supervisa la ejecución de las actividades, asegurando cumplimiento de los objetivos, plazos y entregables establecidos.
- **Dirección general de seguridad, procesos y sistemas corporativos:** responsable del desarrollo e implementación de la infraestructura tecnológica del sistema. Incluye la gestión de servidores, el procesamiento de datos, el desarrollo de modelos de inteligencia artificial y creación de herramientas de visualización para los usuarios operativos.
- **Dirección general financiera y de control de gestión:** encargada de la planificación, gestión, y control de presupuesto del proyecto, asegurando el uso eficiente de los recursos financieros.
- **Dirección general de circulación y gestión de capacidad:** responsable de la operación en tiempo real del sistema ferroviario, utilizando la información que se ha generado mediante inteligencia artificial para la toma de decisiones operativas, incluyendo la gestión de incidencias, limitaciones de velocidad y medidas de seguridad.

Tabla 2.

Asignación de responsabilidades (RACI simplificado)

Actividad	Responsable (R)	Apoyo (A)	Supervisión (S)
Planificación del proyecto	Dirección de planificación estratégica	Dirección financiera	Dirección general
Desarrollo de infraestructura tecnológica	Dirección de sistemas	Dirección de mantenimiento	Dirección de planificación

Implementación de sensores y captura de datos	Dirección de mantenimiento	Dirección de sistemas	Dirección de planificación
Desarrollo de modelos de IA	Dirección de sistemas	Científico de datos	Dirección de planificación
Monitoreo y gestión de alertas	Dirección de circulación	Dirección de mantenimiento	Dirección de seguridad
Ejecución de mantenimiento correctivo	Dirección de mantenimiento	Dirección de Circulación	Dirección general
Capacitación de personal	Dirección de gestión de personas	Dirección de sistemas	Dirección de planificación
Control presupuestario	Dirección financiera	Dirección de planificación	Dirección general

Nota. Elaboración propia.

Cronograma de ejecución

El cronograma de ejecución del proyecto se ha estructurado en distintas fases que permiten una implementación progresiva del sistema de mantenimiento basado en condición. Estas fases incluyen la selección de entorno piloto, la instalación de sensores en los trenes, el desarrollo de la infraestructura tecnológica, el entrenamiento de los modelos de inteligencia artificial, la creación de herramientas de visualización y la realización de pruebas en campo. Así mismo, se contempla una fase de despliegue e integración del sistema, seguida de actividades de evaluación, ajuste y auditoría de impacto. Esta planificación temporal permite coordinar de manera eficiente las actividades del proyecto y facilitar su adopción progresiva dentro de las operaciones de Adif y Renfe.

Tabla 3

Cronograma de actividades del proyecto

[illegible]

Instalación de sensores															
Creación de infraestructura															
Entrenamiento modelos IA															
Creación de herramientas															
Pruebas en campo															
Evaluación y ajustes															
Creación T. Capacitación															
Despliegue e integración															
Feedback															
Auditoría de impacto															

Nota. Elaboración propia

Presupuesto

La viabilidad de la estrategia que se propone depende de una asignación adecuada de recursos equilibrada, que no solo permita la adquisición de tecnología, si no también la sostenibilidad operativa y una correcta capacitación del personal involucrado.

En este apartado se detalla la inversión necesaria para la implementación de un sistema basado en inteligencia artificial y mantenimiento basado en condición (CBM), asegurando que los recursos se utilicen de manera eficiente para resolver los retos operativos del sistema ferroviario español.

El presupuesto ha sido estructurado contemplando tanto la inversión inicial así como la infraestructura técnica y los servicios de soporte y sus costos asociados, permitiendo una visión integral de impacto económico del proyecto. Por ello, la inversión se ha dividido en cuatro pilares fundamentales:

- **Inversión en hardware:** En esta parte del presupuesto se hace una estimación del coste total que supondría en la adquisición de todo material físico para la implementación de la solución. Se ha tenido en cuenta el número de sensores que haría

falta por tren multiplicando por el número de trenes en servicio tanto para la alta velocidad como en cercanías.

- **Inversión en infraestructuras del sistema:** Aquí se detalla toda la infraestructura que habría que poner en funcionamiento para poder hacer un despliegue efectivo de la IA. Incluye servidores,almacenamiento y ciberseguridad.
- **Desarrollo de software e IA:** En esta parte se desglosa todo lo relacionado con el desarrollo de los modelos IA y las herramientas que deben ser desarrolladas para la implementación de los nuevos sistemas.
- **Gastos operativos y personal:** Aquí encontramos todo el gasto relacionado con los sueldos de los profesionales relacionados con la implementación de los nuevos sistemas y sobre los cursos de capacitación. Se tiene en cuenta el coste para la creación de talleres y cursos para los profesionales,además del costo en sueldo de los profesionales de big data e IA encargados del desarrollo de los modelos de predicción.

A continuación, se presenta el desglose detallado de la inversión inicial necesaria para la implementación del proyecto:

Tabla 4

Inversión inicial del proyecto (CAPEX)

Cantidad	Descripción	Precio unitario	importe
800	Kits de sensorización en trenes de alta velocidad (4 sensores por tren)	2.250,00 €	1.800.00,00 €
3600	Kit de sensorización de trenes de cercanías (4 sensores por tren)	2.250,00 €	8.100.000,00 €
1100	Unidades de procesamientos a bordo (1 por tren)	8.000,00 €	8.800.000,00 €
200	Dispositivos móviles para técnicos de campo	800,00 €	160.000,00 €
1	Servidores GPU	950.000,00 €	950.000,00 €
1	Almacenamiento seguro y cifrado	120.000,00 €	120.000,00 €

1	Sistemas de ciberseguridad	100.000,00 €	100.000,00 €
1	Desarrollo de algoritmos para auscultación de infraestructura	350.000,00 €	350.000,00 €
1	Desarrollo de modelos CBM	120.000,00 €	120.000,00 €
1	Integración de manuales y normativa en LLM	85.000,00 €	85.000,00 €
1	Herramientas (gemelos digitales, monitoreo en tiempo real)	200.000,00 €	200.000,00 €
1	Plataforma web y aplicación móvil	60.000,00 €	60.000,00 €
20	Expertos en ciencia de datos e ingeniería	60.000,00 €	1.200.000,00 €
1	Plataforma de capacitación y materiales e-learning	100.000,00 €	100.000,00 €
1	Infraestructura de conectividad (5G/GPRS y transmisión de datos)	500.000,00 €	500.000,00 €
1	Integración de sistemas de Adif y Renfe	300.000,00 €	300.000,00 €x
		Subtotal CAPEX:	22.945.000,00 €

Nota. Elaboración propia.

Una vez que se ha definido la inversión inicial, es necesario considerar los costos asociados a la operación y mantenimiento del sistema durante su ciclo de vida.

Tabla 5.

Costos operativos del sistema (OPEX)

Concepto	Importe anual
Mantenimiento y soporte del sistema (≈10% del CAPEX)	2.294.500,00 €

Nota. Elaboración propia

Adicionalmente, se contempla un fondo de contingencia destinado a cubrir posibles desviaciones o imprevistos durante la implementación del proyecto.

Tabla 6.

Fondo de contingencia

Concepto	Importe
Fondo de contingencia (5% del CAPEX)	1.147.250,00 €

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, se consideran los impuestos correspondientes a la inversión inicial del proyecto.

Tabla 7.

Impuestos

Concepto	Importe
IVA (21%)	4.818.450,00 €

Nota. Elaboración propia.

En conjunto, la estructura del presupuesto permite diferenciar claramente entre la inversión inicial y los costos operativos, facilitando en el análisis de la viabilidad económica del proyecto. Esta planificación financiera sienta las bases para una futura evaluación del retorno de inversión considerando los beneficios esperados en la reducción de incidencias, optimización del mantenimiento y mejora de la eficiencia operativa en el sistema ferroviario gestionado por Adif y operado por Renfe.

Referencias bibliográficas

- Adif. (2025). Información institucional. <https://www.adif.es/sobre-adif/transparencia/institucional>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2024). *Tecnologías de inteligencia artificial (AI) en el mantenimiento de activos del sector eléctrico*.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Tecnologias-de-Inteligencia-Artificial-AI-en-el-mantenimiento-de-activos-del-sector-electrico.pdf>
- Herrero, I. (2018). Mantenimiento predictivo en el sector ferroviario. *Revista Vía Libre Técnica*.
- KONUX. (2024). *Spanish rail gets an infrastructure boost with switch monitoring from KONUX*.
<https://konux.com/spanish-rail-gets-an-infrastructure-boost-with-switch-monitoring-from-konux/>
- MajidiParast, S., Monemi, R. N., & Gelareh, S. (2025). *A graph convolutional network for intelligent predictive maintenance of railway tracks*. *Decision Analytics Journal*.
- Mukherjee, D., Di Santi, E., Lefebvre, C., & Mijatovic, N. (2025). *CVCM track circuits preemptive failure diagnostics for predictive maintenance using deep neural networks*. *arXiv*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.09054>
- Renfe. (2024). Gobierno corporativo y transparencia. <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/gobierno-corporativo-y-transparencia/gobierno-corporativo>
- Velásquez Muñoz, Y. J. (2025). Plan de mantenimiento integral para motores de tracción ferroviarios con incorporación de técnicas predictivas [*Trabajo fin de grado, Universitat Politècnica de València*]. *RiuNet*. <https://riunet.upv.es/entities/publication/fa1ba99d-9837-4511-84ef-abe2cf62dffb>