



MÁSTER EN INGENIERIA INDUSTRIAL (MII)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Digitalización e Industria 4.0 para Optimización de un Centro de  
Mantenimiento Ferroviario

Autor: Jorge Eugenio Prieto Rivero

Director: Nicolás Sanz Ernest

Madrid

Enero de 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título:  
Digitalización e Industria 4.0 para Optimización de un Centro de Mantenimiento Ferroviario en  
la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2023-2024 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni  
total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Jorge Prieto Rivero Fecha: 07/ 01/ 2024

A handwritten signature in black ink that reads "Jorge Prieto". The signature is stylized with a large, sweeping flourish at the end.

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Nicolás Sanz Ernest Fecha: 07/ 01/ 2024

A handwritten signature in blue ink. The signature is highly stylized and cursive, appearing to read "Nicolás Sanz Ernest".



## MÁSTER EN INGENIERIA INDUSTRIAL (MII)

### TRABAJO FIN DE MÁSTER

Digitalización e Industria 4.0 para Optimización de un Centro de  
Mantenimiento Ferroviario

Autor: Jorge Eugenio Prieto Rivero

Director: Nicolás Sanz Ernest

Madrid

Enero de 2024

## Contenido

Resumen Ejecutivo.....	5
Executive Summary .....	11
Anexo: Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	17
Introducción y Desafíos .....	25
Metodología y Estado del Arte.....	31
Indicadores Principales de Rendimiento (KPIs) .....	39
Disponibilidad.....	40
Fiabilidad .....	43
Costes .....	45
Medioambiente.....	50
Seguridad y Bienestar.....	52
Capital Humano.....	53
Tecnologías y Soluciones Verdes .....	57
Contratos de Mantenimiento .....	63
Mantenimiento Predictivo e Industria 4.0 .....	73
Mejoras Logísticas .....	81
Automatización .....	89
Gemelos Digitales y Realidad Virtual.....	97
Aplicación Práctica .....	105
Conclusión.....	111
Bibliografía .....	113

# Resumen Ejecutivo

Digitalización e Industria 4.0 para Optimización de un Centro de Mantenimiento Ferroviario

**Autor: Prieto Rivero, Jorge Eugenio.**

Director: Sanz Ernest, Nicolás

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

La industria ferroviaria desde el inicio de la era industrial se ha convertido en el sistema sanguíneo del sistema de producción mundial. Las limitaciones en el transporte de mercancías marítimo para acceder a los focos industriales de interior y los altos costes de transporte y de combustible de otros métodos de transporte lo convirtieron en la infraestructura predilecta del siglo pasado.

Sin embargo, el cambio de paradigma propuesto por la eficiencia generalizada en las industrias históricas de mayor escala. La transición a las renovables, la deslocalización de la industria, el desarrollo de las redes de logística y transporte para hacer frente a nuevas necesidades de mercado, el desarrollo del comercio mundial y el cambio de los comportamientos de compra de la sociedad han puesto bajo la mirilla al histórico sector.

La tecnología desarrollada por el sector ferroviario, su operación y mantenimiento, representa una oportunidad perfecta para conseguir un escenario de descarbonización cada vez más exigente. El tren, como tecnología de transporte mercantil y de personas, se ha convertido en una pieza angular dentro de la descarbonización de la logística en las economías desarrolladas.

El cambio de los motores y trenes de combustibles fósiles a eléctricos, el incremento del consumo de energías renovables, y la implementación medidas innovadores para conseguir ahorro energético permiten el desarrollo de una infraestructura de transporte verdaderamente verde. Además, las prácticas de mantenimiento y construcción innovadoras, como el uso de materiales más eficientes y ligeros y técnicas gestión del consumo de energía, permiten maximizar la eficiencia de los equipos tecnológicos y

reducir el impacto en el medioambiente específico de la infraestructura ferroviaria en su conjunto.

Durante la realización del proyecto se han utilizado una serie de técnicas enfocadas en facilitar la búsqueda de información relevante y perfeccionar la capacidad de agruparla y entenderla. Con este espíritu de facilitar la replicabilidad y la organización adecuada en futuros trabajos se dedicará el apartado de metodología.

Para una búsqueda eficiente y relevante se debe realizar una metodología de búsqueda por palabras clave. La metodología por palabras clave resulta fundamental ya que se adecúa al funcionamiento de los algoritmos de búsqueda característicos de los motores de búsqueda. Adicionalmente los motores de búsqueda cuentan con motores propios para realizar búsquedas con términos específicos de manera que puedas realizar bastantes “queries” separadas pero condicionantes con algebra de Boole.

El método se realiza mediante un proceso sistemático de selección de términos específicos conocidos como palabras clave que deben estar incluidos o excluidos. Estos términos deben encapsular la temática principal que siguen los temas de los estudios a explorar. Los términos también deberían conseguir capturar las generalidades de los temas a discurrir de manera que devuelvan los estudios relevantes deseados.

En este aspecto el idioma de búsqueda a utilizar será siempre el idioma inglés ya que en materia técnica y aplicación de estrategias novedosas es el de mayor aplicación, además de que los términos técnicos específicos no son capturados adecuadamente por las herramientas de búsqueda a la hora de traducirlas entre idiomas.

Para la determinación de los indicadores principales de rendimiento la dinámica seguida es similar a la de la búsqueda de información académica salvo que el proceso iterativo no ha sido específico para ello, sino que los diferentes indicadores se han visto representados naturalmente al estudiar las técnicas y las áreas principales sobre las que tienen efecto.

Al extrapolar la identificación de estos indicadores a la planta sobre la que se han investigados las posibles mejoras se identifican las fallas principales de la planta en estudio y se identifica la mejor manera de aplicar los métodos para mejorar esos indicadores. El análisis se fundamenta en la literatura académica desarrollada durante el

trabajo además de en el conocimiento adquirido durante estudios, prácticas y la realización de este trabajo.

Tras la consecución de la lectura intensiva, sobre la que se elaboran los indicadores a nivel micro se pasa a la fase del proceso que involucra la agrupación de estos en diferentes clústeres. Estos clústeres que engloban a los diferentes indicadores se han decidido por su vínculo subjetivo relacionado, por su importancia en el contexto general de la sostenibilidad, la justicia social y laboral y por su importancia para la supervivencia del sector ferroviario. Los clústeres de variables decididos y sobre los que se han integrado los indicadores principales de rendimiento son los siguientes:

- Indicadores principales vinculados a la disponibilidad de la flota de ferrocarriles.
  - Disponibilidad Operativa
  - Tiempo Medio entre Fallas
  - Tiempo Medio de Reparación
  - Incidencia de Averías
- Indicadores principales vinculados a la fiabilidad de la flota de ferrocarriles tras su mantenimiento
  - % Paradas no Programadas
  - Efectividad del Transporte de Carga
  - % Mantenimiento Correctivo
- Indicadores principales vinculados con los costes de mantenimiento derivados de las operaciones de mantenimiento
  - Coste Total Mantenimiento Correctivo
  - Coste Total Mantenimiento Preventivo
  - Coste Total Mantenimiento Predictivo
  - Costes Indirectos de Interrupción
- Indicadores principales para la sostenibilidad de los sistemas empleados durante el mantenimiento de los ferrocarriles enfocados a su impacto en el medioambiente
  - Consumo de Energía Medio Mantenimiento
  - Consumo de Energía Renovable
  - Emisiones por Mantenimiento
- Indicadores principales vinculados a la seguridad y el bienestar de los trabajadores
  - Índice de Accidentes Laborales
  - Tiempo Medio de Respuesta ante Emergencias
- Indicadores principales vinculados al capital humano del mantenimiento de los ferrocarriles.
  - Porcentaje de Cumplimiento del Mantenimiento Preventivo
  - Porcentaje de Desarrollo Laboral

Durante el trabajo se han valorado las soluciones tecnológicas separadas por grupos naturales y por ello se han armonizado las medidas que se proponen en la actualidad y las tendencias existentes.

Para entender la temática del mantenimiento ferroviario es importante considerar los contratos de mantenimiento sobre los que se opera en la actualidad y sus especificaciones a nivel de operación y de costes. Por ello se han considerado los factores principales que llevan a la selección de unos tipos de contratos sobre otros, sus pros y contras y ejemplos de desarrollos recientes y de escala que fundamentan las dinámicas de mercado en selección de tipos de contratos que están teniendo lugar.

El desarrollo de tecnologías verdes en el mantenimiento ferroviario es de gran importancia ya que representa la viabilidad a largo plazo de este sector. Su puesta en prioridad por la Unión Europea además del progresivo reemplazo de las flotas mundiales por locomotoras con menores emisiones demuestra un horizonte de posibilidades en las que la prioridad de la sostenibilidad se contempla. Sistemas de iluminación novedosos, mitigación de ruidos, equipamientos modernos con ahorros energéticos relevantes, instalaciones de medición y despliegue de baterías son algunas de estas dinámicas de transición renovable analizadas.

El mantenimiento predictivo corresponde a la sección de las técnicas del trabajo sobre el que existe más documentación. Esto se debe a que representa el siguiente límite sobre el que ya se han desarrollado productos viables, tiene impacto en el mercado, ve su aplicación natural en el mantenimiento por el comportamiento histórico de recopilación de datos de fallas previas y opera con componentes tecnológicos con razonable capacidad de medición y de previsión de roturas.

Con el objetivo de generar una mayor comprensión del proceso de mantenimiento predictivo a nivel tecnológico y de aplicación se ha procedido a la explicación de la capa de tecnología clave, los componentes sobre los que se aplica dentro del mantenimiento del tren, casos y estudios de aplicación y diferentes estadísticas que favorecen el caso para su uso y las inversiones que se están llevando a cabo en esta técnica de mejora de operación y costes en el mantenimiento.

Las mejora logística en la red es una categoría agrupadora que se ha tratado refiriéndose a los métodos en la literatura científica para reducir la congestión y mejorar la disponibilidad de los activos ferroviarios para realizar servicios y aumentar el retorno económico de las operaciones ferroviarias.



La congestión de la red ferroviaria es uno de los problemas que afecta negativamente a la red. La incapacidad de la red para gestionar la acumulación de trenes, así como la saturación de la infraestructura en puntos específicos aumenta los tiempos de espera, reduce los flujos posibles de carga y personas a transportar y condiciona pérdidas dentro del sistema. En este esfuerzo se han detectado una serie de métodos de simulación y de anticipación de fallas que son vitales para aliviar la congestión en los talleres ferroviarios además de su fundamentación con estudios científicos y casos previos.

En el apartado de automatización se ha tratado de englobar las técnicas en desarrollo y aplicación para la automatización de los procesos de mantenimiento ferroviario. El alcance de esta automatización se enfoca principalmente en la robotización y la digitalización por lo que se llevarán a cabo pequeñas explicaciones en torno a estas características. Durante el desarrollo del trabajo se han considerado los esquemas habituales de implementación, las mejoras esperadas, el impacto en las operaciones y el estado en el presente en robotización y digitalización.

Finalizando el análisis de las técnicas, se ha analizado el impacto de los gemelos digitales, la realidad virtual y ejemplificar las técnicas empleadas para su uso. Las técnicas de digitalización que se están llevando a cabo y descritas durante el desarrollo del trabajo son de gran utilidad ya que son facilitadoras de poder llevar a cabo el análisis de datos necesario para la creación del gemelo digital y para la consecuente simulación.

A su vez los gemelos digitales cuentan con gran interacción a la hora de integrarse con tecnologías de realidad virtual. La integración entre las dos tecnologías permite por un lado crear programas para facilitar la asistencia remota con mucha mayor precisión al poder asistir sobre una copia digital del objeto real. Por otro lado, es también un desarrollo extenso para el entrenamiento a través de su uso en entornos virtuales que pueden replicar la operación real de los equipamientos.

Por último, durante el desarrollo del trabajo se ha incluido la aplicación de métodos y la mejora en los indicadores esperados para una planta real que contaba con una serie de posible mejoras en costes, entrenamiento de la mano de obra, manejo de datos, automatización y prácticas sostenibles.

En este proceso de estudio se han realizado las recomendaciones estudiadas durante el trabajo tanto como recomendación del proceso a llevar a cabo, las mejores praxis y el efecto que estos procesos tendrán sobre algunos de los indicadores estudiados más relevantes.

El proceso de aplicación práctica sirve como manera de cerrar el estudio llevado a cabo y de contribuir al desarrollo de trabajos futuros al establecer un marco posible de uso de las técnicas estudiadas. A su vez, las recomendaciones conseguidas serán de potencial aplicación a proyectos reales.

# Executive Summary

Digitalization and Industry 4.0 for the Optimization of a Railway Maintenance Centre

**Author: Prieto Rivero, Jorge Eugenio.**

Director: Sanz Ernest, Nicolás

Entity Collaborating: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **SUMMARY OF THE PROJECT**

Since the beginning of the industrial era, the railway industry has become the lifeblood of the world's production system. The limitations of maritime freight transport to access inland industrial centers and the high transport and fuel costs of other transport methods made it the infrastructure of choice in the last century.

However, the paradigm shift proposed by widespread efficiency in the historic larger-scale industries. The transition to renewables, the offshoring of industry, the development of logistics and transport networks to meet new market needs, the development of global trade and changing societal purchasing behaviors have put the historic sector under the spotlight.

The technology developed by the rail sector, its operation and maintenance, represents a perfect opportunity to achieve an increasingly demanding decarbonization scenario. The train, as a technology for transporting goods and people, has become a cornerstone in the decarbonization of logistics in developed economies.

The switch from fossil fuel to electric engines and trains, the increased consumption of renewable energies, and the implementation of innovative energy saving measures allow the development of a truly green transport infrastructure. In addition, innovative maintenance, and construction practices, such as the use of more efficient and lighter materials and energy consumption management techniques, maximize the efficiency of technological equipment and reduce the specific environmental impact of the railway infrastructure as a whole.

During the project, a series of techniques have been used to facilitate the search for relevant information and to improve the ability to group and understand it. It is in this spirit of facilitating replicability and proper organization in future work that the methodology section will be dedicated.

For an efficient and relevant search, a keyword search methodology must be used. The keyword methodology is fundamental as it is adapted to the operation of the search algorithms characteristic of search engines. Additionally, search engines have their own engines to perform searches with specific terms so that you can perform many separate but conditional queries with Boolean algebra.

The method is done through a systematic process of selecting specific terms known as keywords to be included or excluded. These terms should encapsulate the main thematic theme that follows the topics of the studies to be explored. The terms should also manage to capture the generalities of the topics to be explored to return the desired relevant studies. In this respect, the search language to be used will always be English, as it is the most widely used language in technical matters and the application of novel strategies, and specific technical terms are not adequately captured by search tools when translated between languages.

For the determination of the main performance indicators the dynamics followed is similar to that of academic information search except that the iterative process has not been specific to it, but the different indicators have been represented naturally when studying the techniques and the main areas on which they have an effect.

Al extrapolar la identificación de estos indicadores a la planta sobre la que se han investigados las posibles mejoras se identifican las fallas principales de la planta en estudio y se identifica la mejor manera de aplicar los métodos para mejorar esos indicadores. El análisis se fundamenta en la literatura académica desarrollada durante el trabajo además de en el conocimiento adquirido durante estudios, prácticas y la realización de este trabajo.

- After the achievement of the intensive reading, on which the indicators are elaborated at the micro level, we move on to the phase of the process that involves the grouping of these indicators in different clusters. These clusters encompassing the different indicators have been decided by their related subjective link, by their importance in the general context of sustainability, social and labor justice and by

their importance for the survival of the railway sector. The clusters of variables decided and on which the main performance indicators have been integrated are the following:

- Main indicators related to the availability of the rail fleet.
  - Operational Availability
  - Mean Time Between Failures
  - Mean Time to Repair
  - Incidence of Failures
- Main indicators related to the reliability of the railroad fleet after maintenance.
  - % Unscheduled Stoppages
  - Freight Transportation Effectiveness
  - % Corrective Maintenance
- Main indicators linked to maintenance costs derived from maintenance operations.
  - Total Corrective Maintenance Cost
  - Total Preventive Maintenance Cost
  - Total Predictive Maintenance Cost
  - Indirect Outage Costs
- Main indicators for the sustainability of the systems used during railroad maintenance with a focus on their impact on the environment.
  - Medium Maintenance Energy Consumption
  - Renewable Energy Consumption
  - Maintenance Emissions
- Key indicators related to worker safety and wellbeing
  - Occupational Accident Rate
  - Average Emergency Response Time
- Main indicators related to the human capital of railroad maintenance.
  - Percentage of Compliance with Preventive Maintenance.
  - Percentage of Labor Development

In the course of the work, the technological solutions separated by natural groups have been evaluated and therefore the measures currently proposed, and the existing trends have been harmonized.

In order to understand the subject of railway maintenance, it is important to consider the maintenance contracts currently in operation and their specifications in terms of operation and costs. Therefore, we have considered the main factors that lead to the selection of some types of contracts over others, their pros and cons and examples of recent developments and scale that underpin the market dynamics in selection of contract types that are taking place.

The development of green technologies in rail maintenance is of great importance as it represents the long-term viability of this sector. Its prioritization by the European Union in addition to the progressive replacement of the world's fleets by locomotives with lower emissions demonstrates a horizon of possibilities in which the priority of sustainability is contemplated. Innovative lighting systems, noise mitigation, modern equipment with significant energy savings, measurement facilities and battery deployment are some of the renewable transition dynamics analyzed.

Predictive maintenance corresponds to the section of the techniques of the work on which there is more documentation. This is because it represents the next limit on which viable products have already been developed, has market impact, sees its natural application in maintenance by the historical behavior of data collection of previous failures and operates with technological components with reasonable capacity for measurement and prediction of breakage.

With the objective of generating a greater understanding of the predictive maintenance process at the technological and application level, we have proceeded to the explanation of the key technology layer, the components on which it is applied within train maintenance, cases and application studies and different statistics that favor the case for its use and the investments that are being made in this technique to improve operation and costs in maintenance.

Network logistics improvement is a grouping category that has been discussed referring to methods in the scientific literature to reduce congestion and improve the availability of rail assets to perform services and increase the economic return from rail operations. Congestion on the rail network is one of the problems that negatively affects the network.

The inability of the network to manage the accumulation of trains, as well as the saturation of the infrastructure at specific points increases waiting times, reduces the possible flows of cargo and people to be transported and conditions losses within the system. In this effort, a series of simulation and fault anticipation methods that are vital to alleviate congestion in railway workshops have been detected, in addition to their substantiation with scientific studies and previous cases.

In the automation section we have tried to encompass the techniques in development and application for the automation of railway maintenance processes. The scope of this automation is mainly focused on robotization and digitalization, so small explanations will be carried out around these features. During the development of the work, the usual implementation schemes, the expected improvements, the impact on operations and the present state of robotization and digitalization have been considered.

The analysis of the techniques was completed by analyzing the impact of digital twins, virtual reality and exemplifying the techniques employed for their use. The digitalization techniques that are being carried out and described during the development of the work are of great utility since they are facilitators to carry out the necessary data analysis for the creation of the digital twin and for the consequent simulation.

At the same time, the digital twins have a great interaction when integrating with virtual reality technologies. The integration between the two technologies allows on the one hand to create programs to facilitate remote assistance with much greater precision by being able to assist on a digital copy of the real object. On the other hand, it is also an extensive development for training through its use in virtual environments that can replicate the real operation of the equipment.

Finally, during the development of the work, the application of methods and the improvement in the expected indicators for a real plant with a series of possible improvements in costs, labor training, data management, automation and sustainable practices have been included.

In this study process, the recommendations studied during the work have been made both as a recommendation of the process to be carried out, the best practices and the effect that these processes will have on some of the most relevant indicators studied.

The practical application process serves to close the study carried out and to contribute to the development of future work by establishing a possible framework for the use of the techniques studied. In turn, the recommendations obtained will be of potential application to real projects.





# Anexo: Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El trabajo se encuentra alineado con varios objetivos de desarrollo sostenible por el rol esencial para la descarbonización de las economías y para un modelo de economía sostenible y social a futuro.

Dentro de la iniciativa global de la ONU por encontrar maneras de abordar los desafíos socioeconómicos y medioambientales a los que se enfrenta las sociedades a nivel mundial el sistema ferroviario representa la infraestructura esencial para el transporte de mercancías y personas.

Las congestiones en el transporte provocadas por las continuas crisis de producción y demanda derivadas de sucesos geopolíticos y naturales ayudan a destacar la necesidad de una infraestructura de transporte robusta que permita minimizar los efectos sociales y medioambientales de estos efectos a futuro. Además, dentro del funcionamiento económico normal el efecto de promoción social intrínseco en la simplificación de la movilidad geográfica para los usuarios además de facilitar el movimiento de mercancías refuerza esta visión sobre la relevancia del problema en cuestión sobre los ODS.

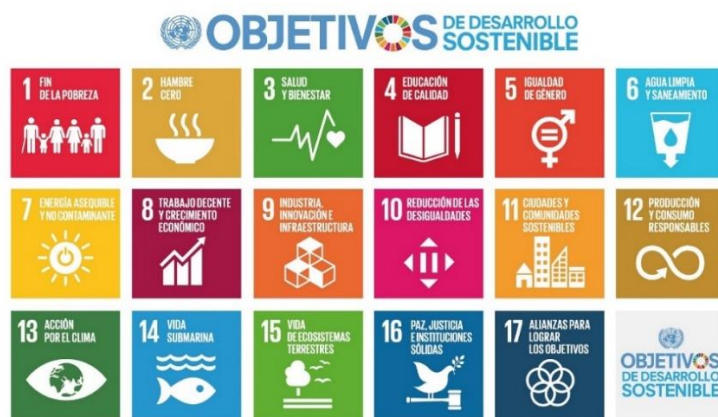


Figura 1: Objetivos de Desarrollo Sostenible

Por la naturaleza el objetivo 9 (industria, innovación e infraestructura es el más alineado con el trabajo, durante el desarrollo se estudian y aplican técnicas a una planta de automatización, robotización, análisis predictivo y gemelos digitales que resultan innovadores para la industria.

La automatización de los equipamientos y procesos en el mantenimiento ferroviario representan una oportunidad de promover el desarrollo sostenible en la industria al reducir la huella de carbono y mejorar las condiciones laborales de la plantilla. La conclusión más eficiente de los procesos y aumento de la eficiencia representan también un pilar importante.

Junto a la robotización de los procesos las tareas de los trabajadores se pueden enfocar en fases más creativas, especializadas y faltas de repetición por lo que se promueve de gran manera la innovación en la infraestructura existente.

El sector también representa, mediante la mejora de sus procesos de mantenimiento, uno de los mejores focos de innovación para el mantenimiento predictivo. Los procesos repetitivos y las fallas habituales y bien estudiadas en los diferentes componentes del equipamiento del sistema ferroviario permiten que se promueva la técnica.

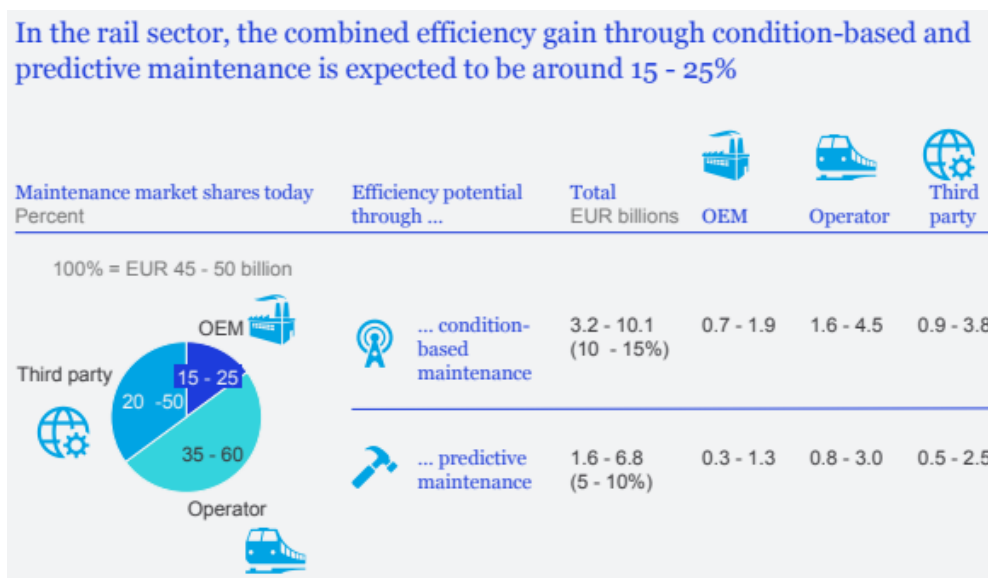


Figura 2: Impacto económico de mejoras en el mantenimiento [MCKINSEY17]

En este aspecto, el mantenimiento predictivo se puede considerar un método de mejora de la infraestructura al adoptar sistemas de monitorización en los componentes relevantes y permitir con un análisis de datos dedicado prever la ocurrencia de problemas y por tanto evitar que ocurran fallas críticas en los sistemas ferroviarios. Descarrilamientos ocasionados por vulnerabilidades en la identificación de fallas pueden provocar derrames de sustancias peligrosas que afecten a los ecosistemas de la zona en su biodiversidad, calidad del agua, del aire e impactando a la salud humana en el corto y largo plazo. La ocurrencia de fuegos dentro de los trenes es también objeto de estudio y se ha visto muy documentado durante el pasado siglo debido a desastrosos accidentes y tiene un efecto duradero en la sociedad y el medioambiente.

En esta labor de mejora del mantenimiento predictivo y por tanto con impacto en la industria en su conjunto se realizan numerosos estudios en las fuentes climáticas de estas fallas y la manera en la que estas se puedan prevenir [ESREL22]. La inclusión de estos componentes de mayor ocurrencia añade profundidad al análisis de las prioridades de desarrollo dentro de una industria sostenible y por tanto representan una importante aportación del mantenimiento ferroviario por su impacto en la disponibilidad y eficiencia del sistema en su conjunto.

El objetivo 7 (energía asequible y no contaminante) se estudia a través de ahorros energéticos de iluminación LED, monitorización de consumo y soluciones renovables. Estos ahorros energéticos se encuentran bien documentados para la industria ferroviaria y otras industrias, pero su aplicación a gran escala depende en gran manera de la transición de los procesos de mantenimiento ferroviario.

Comparisons between Traditional Incandescent lamp , Halogen Incandescent lamp , CFLs, and LEDs						
	60W	43W	15W CFL		12W LED	
	Traditional Incandescent	Energy-Saving Incandescent	60W Traditional	43W Halogen	60W Traditional	43W Halogen
Energy \$ Saved (%)	-	~25%	~75%	~65%	~75%-80%	~72%
Annual Energy Cost	\$4.80	\$3.50	\$1.20		\$1.00	
Bulb Life	1000 hours	1000 to 3000 hours	10,000 hours		25,000 hours	

Tabla 1: Comparación de ahorro energético por tecnologías de iluminación [SUDHIR16]

El impacto de la iluminación LED dentro del ODS 7 está bien documentado y representa una mejora a nivel de costes y medioambiental. Por el lado de los costes la iluminación más barata favorece costes reducidos para los usuarios de la infraestructura ferroviaria mientras que por el lado medioambiental las vidas prolongadas y los ahorros de consumo energético representan factores muy favorables para la sostenibilidad del ecosistema.

La monitorización que favorece un mantenimiento ferroviario eficiente tiene también, adicionalmente al efecto dentro del mantenimiento predictivo, el efecto de facilitar la monitorización del consumo de la energía. El consumo de la energía en el sistema ferroviario y en los procesos de mantenimiento permite ajustar a una mayor eficiencia la demanda mejorando su flexibilidad, pero también permite que se tomen medidas de ahorro energético de manera más dedicada. También una monitorización adecuada permite detectar partes de los procesos en los que se incurre en un consumo energético excesivo y por tanto mejorar la eficiencia o detectar las fallas correspondientes con mucha más precisión.

	Recommended efficiency measure	Subsystem saving potential
Lighting	Intelligent control	10-30%
	Replacement of less efficient lighting	10-40%
Heating and cooling	Intelligent control including temperature setting	10-20%
	Insulation of roof and wall	10-30%
	Renewal of installation	20%
	Modern heat pumps (A+)	Up to 30%
Powered equipment	New efficient drives (A+) and intelligent control	10-40%
Concessions/shops	Targets and energy audits built into contracts	Up to 20% -

Tabla 2: Potencial ahorro energético por soluciones para las edificaciones de transporte ferroviario [DURSUN20]

El impacto de soluciones renovables en el mantenimiento ferroviario se encuentra vinculado estrechamente con la disponibilidad de estos para el sistema ferroviario en su conjunto. Además de la mejora de los indicadores de consumo y generación provenientes de facilitar lugares para la generación de recurso renovable se presentan también las

oportunidades innovadoras de aplicación de tecnologías como las baterías que permiten aumentar la flexibilidad de los sistemas ferroviarios tanto en su consumo energético como por su versatilidad para permitir a trenes eléctricos reemplazar a los diésel en tramos de vía que no se encuentran habilitados en el presente para el uso de trenes eléctricos.

El ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico) es de impacto alto dentro del perímetro del trabajo ya que el desarrollo del sector y el desarrollo económico nacional requiere de accesibilidad del transporte además de una transmisión de conocimiento, aspectos estudiados y trabajados.

Durante el transcurso del trabajo se estudian las técnicas propuestas para el entrenamiento de los equipos de mantenimiento ferroviario por los que se les permiten adquirir conocimientos esenciales para la realización de los nuevos procesos automatizados y robotizados además de las labores de monitorización. La formación mejorada en los procesos es además una manera fundamental de mejorar la competencia y las habilidades de los trabajadores, garantizándoles la valía y la continuidad de su trabajo más allá de las condiciones de la empresa. El desempeño de sus labores puede conseguir mayores cuotas de eficiencia y por ello se convierte en un componente fundamental para promover el ODS8.

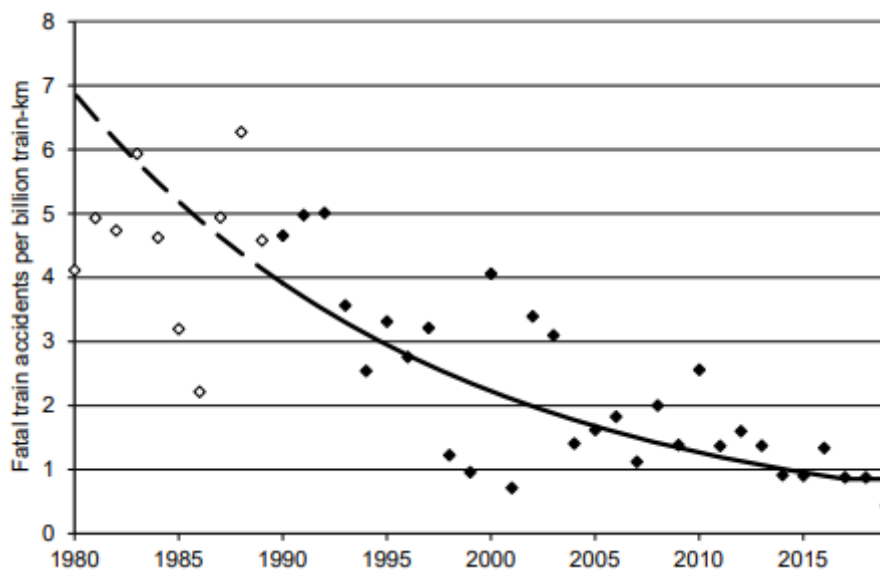


Figura 3: Accidentes ferroviarios mortales EU28 [EVANS28]

El efecto en la reducción de los accidentes de la mano de obra también es uno de los mayores efectos para mejorar el trabajo decente dentro del mantenimiento ferroviario. Todas las técnicas aplicadas ayudan a mejorar la previsión o la eliminación de ciertos accidentes y su inclusión dentro de los indicadores principales a su vez facilita el que estos efectos se consideren prioritarios y se puedan revisar habitualmente.

La reducción de la ocurrencia de accidentes en el ámbito laboral es de extrema relevancia debido al deber de garantizar la integridad física de los trabajadores además de promover la existencia de entornos laborales más seguros y saludables. En agosto de 2023 cinco trabajadores de mantenimiento italianos murieron tras una falla en el protocolo de seguridad que acabó con una colisión de un tren en horario nocturno con los operarios [RTE23] lo que destaca que la ocurrencia de estos accidentes y la necesidad de mejora de los protocolos de seguridad y la aplicación de otras técnicas que de manera directa e indirecta reducen la ocurrencia de estos eventos es de gran relevancia.

El ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles) se encuentra alineado por la aportación a la descarbonización de un sector ferroviario con más eficiencia y capacidad de uso por un mejor mantenimiento.

Para poder cumplir los objetivos en materia de conseguir una sostenibilidad urbana adecuada el mantenimiento ferroviario y la mejora de la disponibilidad y de la eficiencia de los sistemas ferroviarios es vital. El sistema ferroviario representa una oportunidad de mejorar la conectividad de los ámbitos de producción y consumo con la consiguiente mejora económica experimentable por la sociedad dependiente de estos procesos. Es además relevante para el desarrollo de ciudades y comunidades sostenibles no solo por su rol dentro de la logística económica sino por su importancia para la movilidad interna dentro de estas sociedades por su rol en el transporte público.

El uso del transporte público para las comunidades urbanas es creciente en un escenario de creciente densidad de población. La reducción del tráfico y las congestiones por la reducción de la necesidad de vehículos en carretera descongestiona la infraestructura de transporte urbano y reduce en gran medida las emisiones relacionadas con este tipo de transporte. La reducción de las emisiones tiene un impacto directo en la reducción de la contaminación del aire y la creación de ciudades más limpias y saludables.

El sistema ferroviario es no solo vital para producir comunidades sostenibles a través del transporte interurbano, sino que también facilita la conectividad entre ciudades y

regiones. Este transporte facilita la reducción de las brechas económicas urbanas y rurales al facilitar el acceso a las infraestructuras educativas y de salud de las áreas más desarrolladas en tiempos y costes adecuados.





# Introducción y Desafíos

La industria ferroviaria desde el inicio de la era industrial se ha convertido en el sistema sanguíneo del sistema de producción mundial. Las limitaciones en el transporte de mercancías marítimo para acceder a los focos industriales de interior y los altos costes de transporte y de combustible de otros métodos de transporte lo convirtieron en la infraestructura predilecta del siglo pasado.

Sin embargo, el cambio de paradigma propuesto por la eficiencia generalizada en las industrias históricas de mayor escala. La transición a las renovables, la deslocalización de la industria, el desarrollo de las redes de logística y transporte para hacer frente a nuevas necesidades de mercado, el desarrollo del comercio mundial y el cambio de los comportamientos de compra de la sociedad han puesto bajo la mirilla al histórico sector.



Figura 4: Principales líneas de transporte de mercancías europeas [BMK20]

Por ello se reconoce a nivel mundial que la industria ferroviaria está experimentando una transformación significativa para tratar de abordar los desafíos como la progresiva depreciación de los activos, las dinámicas laborales cambiantes y la emergencia climática que requiere de la modernización del sector y por la que se pone en valor la realización de un proyecto de armonización y de aplicación de técnicas relevantes.

En su reciente seminario web, Global Railway exploró el papel de las estrategias basadas en datos como solución a estos desafíos, centrándose en desbloquear todo el potencial de la gestión de activos "a través del uso inteligente de datos, con el objetivo de optimizar las operaciones ferroviarias, mejorar el mantenimiento, alcanzar los objetivos de sostenibilidad y mejorar la eficiencia a través de la toma de decisiones informadas" [GRR23,1].

Se deben buscar formas de adaptar las operaciones de mantenimiento y de operación ferroviario a un escenario climático cambiante y a una mayor imprevisibilidad y escala en los riesgos relacionados con el clima. La creciente incapacidad de anticiparnos a eventos extremos, inundaciones y condiciones meteorológicas extremas pone en un peligro considerable la infraestructura ferroviaria y la viabilidad del transporte a nivel mundial.

La tecnología desarrollada por el sector ferroviario, su operación y mantenimiento, representa una oportunidad perfecta para conseguir un escenario de descarbonización cada vez más exigente. El tren, como tecnología de transporte mercantil y de personas, se ha convertido en una pieza angular dentro de la descarbonización de la logística en las economías desarrolladas.

El cambio de los motores y trenes de combustibles fósiles a eléctricos, el incremento del consumo de energías renovables, y la implementación medidas innovadoras para conseguir ahorro energético permiten el desarrollo de una infraestructura de transporte verdaderamente verde. Además, las prácticas de mantenimiento y construcción innovadoras, como el uso de materiales más eficientes y ligeros y técnicas gestión del consumo de energía, permiten maximizar la eficiencia de los equipos tecnológicos y reducir el impacto en el medioambiente específico de la infraestructura ferroviaria en su conjunto.

Con la optimización de recursos manteniendo la mayor flexibilidad operacional posible se permite al cliente una operación más eficiente de sus activos. Esta flexibilidad y

eficiencia es una de las prioridades dentro de la transformación del sector ferroviario que involucra una cooperación de los actores financieros, tecnológicos e industriales.

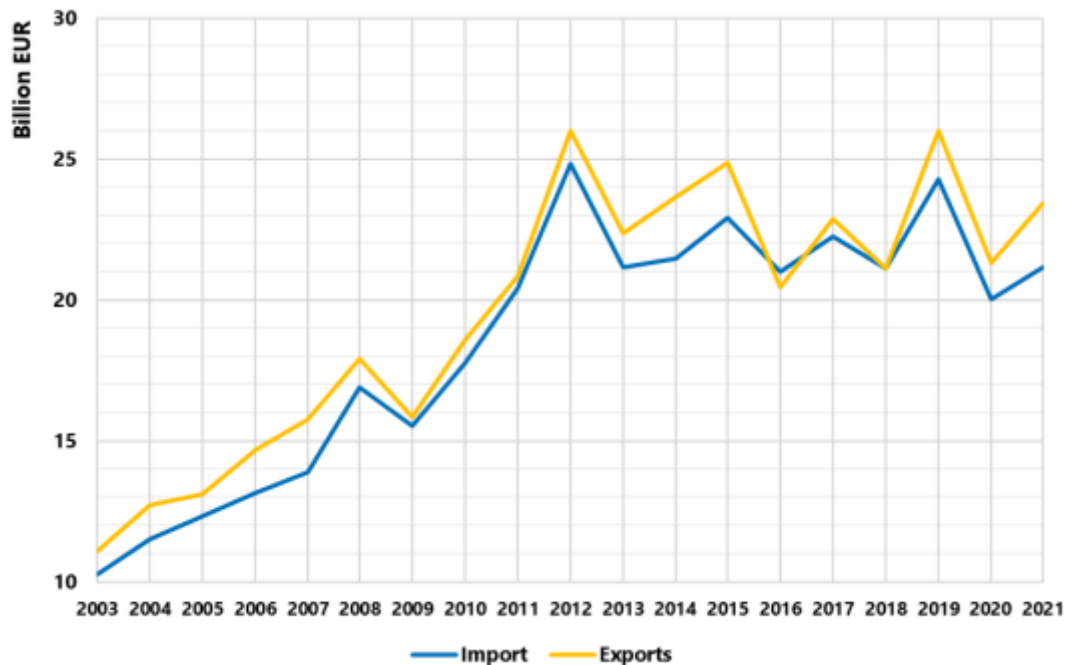


Figura 5: Valor global de importaciones y exportaciones de equipamiento ferroviario [EUP23]

En estos cambios es importante atacar la depreciación de los activos y el cambio de las dinámicas laborales como algunas de las principales debilidades dentro del sector. Respondiendo a la necesidad de la continuidad de las infraestructuras ferroviarias y una transferencia suficiente de talento, se ha llegado a la presentación de propuestas que buscan extender la vida útil de los activos mediante el uso de tecnología predictiva anticipando posibles fallos. Además, se han promovido iniciativas de entrenamiento y promoción de habilidades dentro de la fuerza laboral, con el objetivo de asegurar una transición eficaz del know-how entre las generaciones.

Conseguir apoyar la mejora de la satisfacción del cliente a través de un aumento de la fiabilidad de la red, una mayor transparencia en la información de viaje y un mejor atractivo visual condiciona el desarrollo futuro debido al efecto reputacional que tiene sobre el sector además de conseguir adaptar el servicio a las necesidades modernas y garantizar su uso futuro. Medidas que se estudian en el sector ferroviario al respecto incluyen la adopción de tecnologías de información en tiempo real para proporcionar

información precisa y actualizada a los usuarios, y el diseño innovador de estaciones y trenes para mejorar la experiencia visual y comodidad del viajero.

Es también necesaria una transformación de todo el proceso para mejorar la seguridad a través de la minimización de la acción humana en zonas peligrosas de operación. La presencia física en las vías o en procesos de mantenimiento puede actuar como fuente de accidentes. En el mantenimiento de trenes, esto se puede realizar mediante la automatización de tareas críticas, la implementación de sistemas avanzados de detección y monitoreo, y la introducción de tecnologías robóticas. La adopción de estas medidas no solo reduce el riesgo de accidentes laborales, sino que también mejora la eficiencia y la consistencia de las operaciones.

En este desafío las empresas están llevando a cabo los cambios necesarios de reducción de costes y mejora de mantenimiento a través de una serie de herramientas y socios [RSM&DO23].

El mantenimiento subcontratado es una de las medidas más comunes de conseguir el mantenimiento de los activos ferroviarios debido a la especialización de las empresas dedicadas dentro del sector. Es crucial establecer contratos claros, mecanismos de supervisión efectivos y una comunicación fluida para asegurar la calidad y la eficiencia en la ejecución del mantenimiento subcontratado.

Los consultores estratégicos ofrecen una oportunidad de reformar las estructuras existentes en la empresa de cara a conseguir una gestión de activos eficiente. En este proceso la gestión de activos debe incluir todos los procedimientos, métodos, sistemas y herramientas que permiten optimizar los riesgos y el rendimiento de la flota ferroviaria y su infraestructura.

Para conseguir el mejor valor para la empresa implementar estrategias que aborden la vida completa de los activos, desde la adquisición hasta la disposición es una necesidad. Esto implica la planificación eficiente de mantenimiento, la monitorización continua de los activos mediante tecnologías avanzadas de comunicación, la gestión de riesgos, y canalizar todo para la toma de decisiones precisas.

Por último, de cara al desarrollo de tecnologías novedosas que permiten el avance general de la industria ferroviaria se están realizando desarrollos mediante la aplicación de

realidad virtual y aumentada. Con esta herramienta se pueden conseguir mejoras considerables en el entrenamiento de los operarios, la planificación más personalizada y precisa de los proyectos a realizar, la visualización precisa, rápida y en tiempo real de los parámetros de la flota de activos. Permite entrenamientos seguros en entornos ferroviarios complejos dando un mayor contexto y por tanto especialización en las tareas a realizar.

La impresión 3D se ha convertido en otra de las tecnologías novedosas más discutidas por su capacidad para garantizar reemplazos de piezas de difícil acceso para el mantenimiento ferroviario al promover una descentralización de la producción de las piezas que simplifica en gran medida la logística.



# Metodología y Estado del Arte

Durante la realización del proyecto se han utilizado una serie de técnicas enfocadas en facilitar la búsqueda de información relevante y perfeccionar la capacidad de agruparla y entenderla. Con este espíritu de facilitar la replicabilidad y la organización adecuada en futuros trabajos se dedicará el apartado de metodología.

La primera técnica a explicar procede directamente de como se ha organizado la realización del trabajo. Para realizar la recomendación de técnicas para el sector de mantenimiento ferroviario se ha necesitado realizar una búsqueda de documentación previa, estudios relevantes y noticias de procesos similares y vinculados al tema de estudio.

Para una búsqueda eficiente y relevante se debe realizar una metodología de búsqueda por palabras clave. La metodología por palabras clave resulta fundamental ya que se adecúa al funcionamiento de los algoritmos de búsqueda característicos de los motores de búsqueda. Adicionalmente los motores de búsqueda cuentan con motores propios para realizar búsquedas con términos específicos de manera que puedas realizar bastantes “queries” separadas pero condicionantes con algebra de Boole.

De cara a poder hacer un mejor uso de estos motores de búsqueda es de relevancia comprender el funcionamiento de estos. El primer proceso a realizar es el proceso de rastreo (crawling). Para ello los motores de búsqueda hacen uso de robots (crawlers) que el motor de búsqueda utiliza para tareas de exploración en la web.

En la realización del rastreo se extraen de las páginas seleccionadas información relevante como texto, enlaces y metadatos. Esta información se almacena por el motor de búsqueda para su utilización en los procesos posteriores. Este proceso de rastreo debe enmarcarse como un proceso esencial introductorio pero que no consta como un proceso de alta repetición por parte del motor de búsqueda. Para su realización se priorizan páginas que resulten novedosas o que cuenten con mayor tráfico y relevancia.

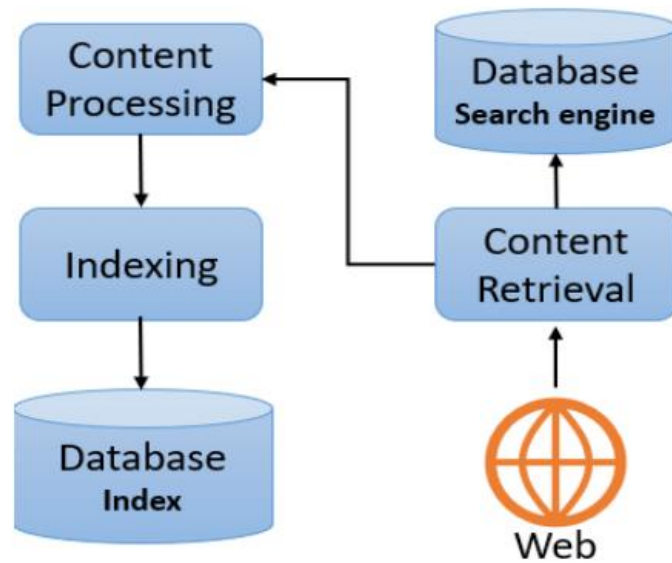


Figura 6: Procedimiento de indexación web. Fuente [VINUTHA23]

La segunda fase después del procedimiento de rastreo para los motores de búsqueda es el procedimiento de indexación el cual se enfoca en el almacenamiento y procesado de la información. La información procesada es organizada por el motor de búsqueda para poder ser más eficiente a la hora de recuperarla.

El proceso conlleva la organización mediante vincular los diferentes términos con los vínculos web de las páginas relevantes. Con este proceso automático se desarrolla una base de datos que se actualiza de manera continua y automática siguiendo el procedimiento de rastreo de los crawlers.

Al igual que en otros procesos que requieren de procesamiento de datos se encuentra altamente influenciado de la eficacia del proceso de rastreo y por tanto la detección de palabras clave y otros metadatos encontrados por el rastreo alterarán considerablemente los resultados de búsqueda que se conseguirán en fases posteriores.



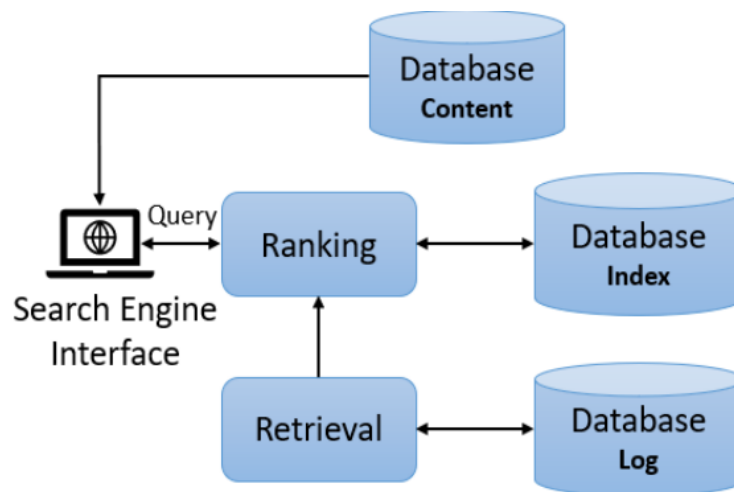


Figura 7: Procedimiento de clasificación web. Fuente [VINUTHA23]

Tras el procedimiento de indexación de los resultados se procede a la clasificación de estos (ranking). El paso consiste en ordenar y clasificar los resultados de búsqueda por su relevancia y calidad. El proceso se actualiza de manera rutinaria para adaptarse a las necesidades principales de los usuarios y mantener la relevancia del motor de búsqueda.

En este proceso se determina cual es el orden de los resultados de cara a una consulta por parte de un usuario. Se utilizan algoritmos de clasificación avanzados que priorizan unas páginas sobre otras dependiendo de una diversidad de factores entre los que se encuentran las palabras clave y las etiquetas provenientes de los metadatos.

El benchmarking utilizado para la mejora de estos algoritmos es la experiencia del usuario y por tanto se recompensan los resultados con parcialidad a la satisfacción de la mayoría de los usuarios sobre la posible utilidad de los resultados dados a nivel académico. Esta consideración tiende a favorecer como resultados noticias recientes de medios populares sobre las publicaciones académicas que son de interés para este trabajo.

A favor del proceso de clasificación se valora la interconectividad de las páginas con otras por lo que se favorecen páginas altamente referenciadas en otras. Esto sin embargo se encuentra con la limitación de favorecer la referencia de noticias entre medios lo que puede alterar considerablemente los resultados a la hora de buscar páginas con artículos académicos relevantes.

Tras la exploración del funcionamiento de los motores de búsqueda a la hora recuperar información, proporcionando a los usuarios una herramienta eficaz para explorar la vasta cantidad de datos disponibles en la web se puede elaborar sobre la técnica específica de búsqueda por palabras clave.

El método se realiza mediante un proceso sistemático de selección de términos específicos conocidos como palabras clave que deben estar incluidos o excluidos. Estos términos deben encapsular la temática principal que siguen los temas de los estudios a explorar. Los términos también deberían conseguir capturar las generalidades de los temas a discurrir de manera que devuelvan los estudios relevantes deseados. En este aspecto el idioma de búsqueda a utilizar será siempre el idioma inglés ya que en materia técnica y aplicación de estrategias novedosas es el de mayor aplicación, además de que los términos técnicos específicos no son capturados adecuadamente por las herramientas de búsqueda a la hora de traducirlas entre idiomas.

Buscar páginas con...

todas estas palabras:	<input type="text" value="maintenance"/>	Haz lo siguiente en el cuadro de búsqueda
esta palabra o frase exactas:	<input type="text" value="digital twin"/>	Escribe las palabras importantes: terrier ratonero tricolor
cualquiera de estas palabras:	<input type="text" value="rolling stock train railway"/>	Escribe las palabras exactas entre comillas: "terrier ratonero"
ninguna de estas palabras:	<input type="text"/>	Escribe OR entre todas las palabras que quieras: miniatura OR estándar
números desde el:	<input type="text"/> hasta <input type="text"/>	Añade un signo menos delante de las palabras que no quieras que aparezcan: -roedor, -"Jack Russell"
		Escribe dos puntos seguidos entre los números y añade una unidad de medida: 10..35 kg, 300..500 euros, 2010..2011

A continuación, limitar los resultados por...

idioma:	<input type="text" value="cualquier idioma"/>	Busca páginas en el idioma que selecciones.
región:	<input type="text" value="cualquier región"/>	Busca páginas publicadas en una región determinada.
última actualización:	<input type="text" value="en el último año"/>	Busca páginas actualizadas en el periodo de tiempo especificado.
sitio o dominio:	<input type="text"/>	Busca un sitio (como wikipedia.org) o limita los resultados a un dominio como, por ejemplo, .edu, .org o .gov.
los términos que aparecen:	<input type="text" value="en cualquier lugar de la página"/>	Busca términos en toda la página, en el título de la página o en la dirección web, o enlaces a la página que estás buscando.
tipo de archivo:	<input type="text" value="PDF de Adobe Acrobat (.pdf)"/>	Busca páginas en el formato que prefieras.
derechos de uso:	<input type="text" value="sin filtrar por licencia"/>	Busca páginas que puedas utilizar libremente.

Figura 8: Búsqueda avanzada de Google

La búsqueda avanzada de Google representa la opción deseada por su extensiva cantidad de opciones para customizar la búsqueda además de la potencia de búsqueda de sus algoritmos.

Insertar los diferentes términos deseados en la herramienta permite al motor de búsqueda rastrear su índice desarrollado en la indexación para buscar los documentos, páginas webs y recursos más relevantes. A la hora de presentarlos la indexación específica presenta unos sobre otros dándoles una posición preferente y permitiendo un más fácil acceso a la información.

Una consideración importante en la selección de términos al utilizar la herramienta es la de evitar sobre especificar mucho la búsqueda mediante demasiados términos y condiciones. Una búsqueda eficiente debe de seguir un proceso iterativo en el que se reajustan los términos a demanda de la búsqueda. Identificar patrones en la terminología usada en documentos que se refieren a otros aspectos de investigación y excluirlas, afinar la búsqueda con términos de uso moderno o permitir varias formas de denominar un término relevante ayudan a flexibilizar y mejorar la búsqueda de los archivos.

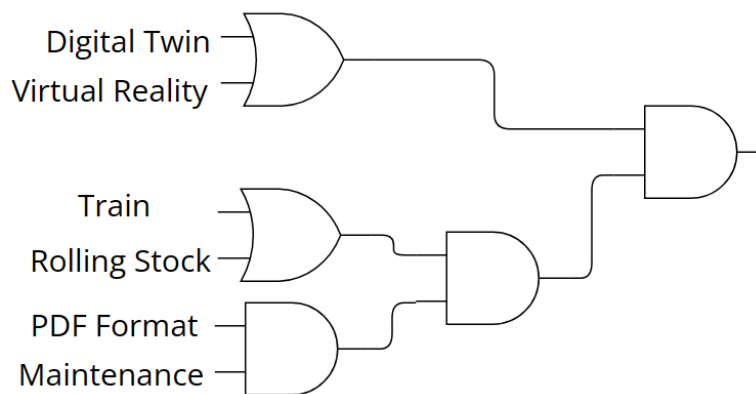


Figura 9: Estructura equivalente de una búsqueda avanzada en álgebra de Boole

Adicionalmente, y como se ha podido transpirar en la explicación, la dinámica de búsqueda mediante términos relevantes utilizando los algoritmos provistos por los motores de búsqueda debe entenderse eminentemente como una labor de álgebra booleana. Mediante el uso de álgebra booleana se puede garantizar una eficiencia en la búsqueda adecuada a estudios de literatura extensivos como el realizado.

El uso de las estructuras AND permite garantizar la inclusión de términos necesarios durante todo el estudio. En el caso de este trabajo alusiones a trenes son necesarios para garantizar que los estudios relevantes se centren en el sector ferroviario. A su vez la inclusión de términos referentes al mantenimiento es necesario para poder asegurarse en cierta manera de que los estudios consultados afecten no a la totalidad del sector ferroviario sino al mantenimiento de sus equipamientos.

En algunos casos la aplicación de terminología dispersa hace que para trabajos extensos se obtengan resultados no deseados de manera que el mantenimiento no sea realizado sobre el equipamiento ferroviario o que esta consideración sea solo una pequeña parte del perímetro del estudio consultado. En estos casos se puede optar por la búsqueda de frases compuestas más largas, aunque esto provoca una limitación muy grande al sobre especificar la búsqueda por parte del motor. Otra vez, merece la pena resaltar el hecho de que este proceso de búsqueda, aún muy facilitado por las herramientas y técnicas mencionadas en este estudio, representa una labor eminentemente humana y que necesita de una comprensión extensiva de los contenidos de estudio, en este caso facilitada por las lecciones aprendidas durante la realización de los estudios académicos y las prácticas laborales relevantes.

<b>Apartado</b>	<b>AND</b>	<b>OR</b>	<b>NOT</b>	<b>FORMAT</b>	<b>DATE</b>
Indicadores Principales de Rendimiento	Maintenance Availability Indicator	Train Rolling Stock Railway Rail		PDF	Last Year
Metodología	Indexing Ranking Methodology	Search Engine Web	Marketing	Any	Any
Mantenimiento Predictivo	Predictive Maintenance	Train Rolling Stock Railway Rail		PDF	Last Year
Gemelos Digitales	Digital Twin	Train Rolling Stock Railway Rail		PDF	Last Year

Tabla 3: Ejemplos de búsquedas realizadas por categorización de términos relevantes

Adicionalmente a los ejemplos descritos también se puede extender la metodología mediante la selección de páginas web específicas. Es de gran importancia conseguir establecer estas barreras claras entre la terminología para conseguir resultados adecuados tanto si se buscan análisis generales, noticias o trabajos específicos en la materia.

La segunda parte de la metodología se refiere a la identificación de los indicadores principales de rendimiento y la aplicación de los métodos estudiados para la planta en cuestión sobre la que se busca trabajar la aportación de ejemplo.

Para la determinación de los indicadores principales de rendimiento la dinámica seguida es similar a la de la búsqueda de información académica salvo que el proceso iterativo no ha sido específico para ello, sino que los diferentes indicadores se han visto representados naturalmente al estudiar las técnicas y las áreas principales sobre las que tienen efecto.

Al extrapolar la identificación de estos indicadores a la planta sobre la que se han investigados las posibles mejoras se identifican las fallas principales de la planta en estudio y se identifica la mejor manera de aplicar los métodos para mejorar esos indicadores. El análisis se fundamenta en la literatura académica desarrollada durante el trabajo además de en el conocimiento adquirido durante estudios, prácticas y la realización de este trabajo.



# Indicadores Principales de Rendimiento (KPIs)

De acuerdo con lo estudiado en la metodología es necesario la clasificación de los impacto de las diferentes técnicas a estudiar mediante unos indicadores principales de rendimiento.

Estos indicadores principales de rendimiento se han elaborado mediante un proceso iterativo de analizar técnicas y agruparlas dentro de categorías razonables. A su vez como parte de la metodología se debe establecer una manera de medir el impacto total de los diferentes KPIs para poder estimar las mejores técnicas a utilizar para el caso práctico.

A la lectura de la literatura disponible se le añade el análisis exhaustivo de los procesos específicos a llevar a cabo dentro del sector ferroviario. Muchas de los indicadores son similares a las del sector ferroviario por la naturaleza de su economía, trabajo y los objetivos que rigen la transformación en este sector.

Tras la consecución de la lectura intensiva, sobre la que se elaboran los indicadores a nivel micro se pasa a la fase del proceso que involucra la agrupación de los mismos en diferentes clústeres. Estos clústeres que engloban a los diferentes indicadores se han decidido por su vínculo subjetivo relacionado, por su importancia en el contexto general de la sostenibilidad, la justicia social y laboral y por su importancia para la supervivencia del sector ferroviario. Los clústeres de variables decididos y sobre los que se elaborará a continuación son los siguientes:

- Indicadores principales vinculados a la disponibilidad de la flota de ferrocarriles.
- Indicadores principales vinculados a la fiabilidad de la flota de ferrocarriles tras su mantenimiento
- Indicadores principales vinculados con los costes de mantenimiento derivados de las operaciones de mantenimiento
- Indicadores principales para la sostenibilidad de los sistemas empleados durante el mantenimiento de los ferrocarriles enfocados a su impacto en el medioambiente

- Indicadores principales vinculados a la seguridad y el bienestar de los trabajadores
- Indicadores principales vinculados al capital humano del mantenimiento de los ferrocarriles.

Las agrupaciones enunciadas permiten una mejor comprensión de los KPIs que se van a utilizar. Sin embargo, estas agrupaciones a su vez se podrían agrupar en torno al impacto económico, sus aspectos tecnológicos o su carácter ESG. Sin embargo, se utilizarán las agrupaciones como base para la explicación de los indicadores principales y de las maneras de medir el impacto de estas.

A su vez un efecto que se debe considerar es que muchos de estos clústeres tienden a consolidar “Diagramas de Venn” entre los diferentes KPIs seleccionados ya que algunos de ellos se aplican en varios grupos.

## Disponibilidad

La disponibilidad es uno de los factores más vitales para la infraestructura ferroviaria y para el desarrollo del sector. Las inversiones de capital para el sector, los tiempos de desarrollo y la mano de obra especializada hacen que los tiempos hasta llegar al mercado sean muy largos. Es por ello por lo que la maximización del uso de los vehículos actúa como un factor vital para conseguir los objetivos de la infraestructura ferroviaria.

La primera variables que tal vez se entiende como más lógica dentro de la disponibilidad es la disponibilidad operativa.

La disponibilidad operativa representa el tiempo que el ferrocarril está disponible y en condiciones de operar durante un período determinado. La manera más eficiente para expresarlo es a través de un porcentaje del tiempo disponible en operación sobre el total.

Al enfocar esta variable como una ecuación se obtiene:



$$\textit{Disponibilidad Operativa} = \frac{\textit{Tiempo Operativo}}{\textit{Tiempo Total}} \times 100$$

Ecuación 1: Disponibilidad Operativa en porcentaje

Para la disponibilidad operativa se considera el tiempo operativo como el tiempo en el que el tren se encuentra en condiciones óptimas y disponible para cumplir sus funciones de transporte de carga o pasajeros. El tiempo operativo no solo debe extenderse a las fases de operación que se hayan programado sino también a aquellas fases de espera para responder a demandas inesperadas y por tanto permitir una mejor gestión de la red.

La siguiente variable en consideración es el tiempo medio entre fallas. Este es uno de los indicadores más utilizados dentro del mantenimiento ferroviario por su simplicidad de monitorización de los datos y su facilidad de identificación de impacto. A su vez el indicador opera con dos parámetros importantes como son el tiempo operativo, anteriormente definido y el número total de fallas.

$$\textit{Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)} = \frac{\textit{Tiempo Operativo}}{\textit{Número Total Fallas}} \times 100$$

Ecuación 2: Tiempo Medio entre Fallas

El número total de fallas es una variable muy utilizado en muchos de los indicadores estudiados durante el desarrollo del trabajo. Representa la cantidad acumulada de eventos que provocan la avería o parada del vehículo durante un tiempo indeterminado de manera no planificada.

Estas fallas incluyen consideraciones como problemas mecánicos, eléctricos y otros incidentes que interrumpen la operación normal de los trenes o sus componentes.

Un buen historial del número de fallas de la flota además de una categorización rica de las características que llevaron al fallo en el primer lugar es fundamental para evaluar la confiabilidad y la eficiencia de los equipos del sistema ferroviario.

Como se elabora más adelante como parte de la digitalización y el mantenimiento predictivo los datos cuantitativos vinculados a estas fallas y su medición precisa son los que permiten identificar áreas de mejora, implementar estrategias preventivas y optimizar la disponibilidad operativa de la flota de manera objetiva y eficaz.

A continuación, se debe estudiar el tiempo medio por parada de mantenimiento o tiempo medio de reparación. Este es otro de los indicadores de disponibilidad dentro del mantenimiento en el sector ferroviario más comunes ya que mide la rapidez de los servicios de mantenimiento realizados.

$$\text{Tiempo Medio de Reparación (MTTR)} = \frac{\text{Tiempo Inactividad}}{\text{Número Total Fallas}} \times 100$$

Ecuación 3: Tiempo Medio de reparación

Para el tiempo medio de reparación además del número total de fallas, anteriormente discutido, se debe considerar el tiempo de inactividad. Este se define de acuerdo con el periodo de tiempo en el que se realiza la retirada del tren de operación mientras se están llevando a cabo las operaciones de mantenimiento. Estas actividades incluyen prácticas como las inspecciones, los ajustes, las reparaciones y las sustituciones de componentes necesarias para completar adecuadamente la operación de mantenimiento.

Un factor que define la disponibilidad desde el lado del mantenimiento es el porcentaje de servicios interrumpidos debido a averías. Este impacto se puede medir a través tanto en su ocurrencia en porcentaje como por los costes derivados para las operadoras de trenes por litigaciones del transporte y por la congestión generada por las averías de los trenes.

Aunque el segundo factor derivado del incumplimiento de horarios por averías se incluye en la sección de costes la ecuación que define la incidencia de los servicios finalizados prematuramente por averías sería el siguiente:

$$\text{Incidencia Averías} = \frac{\text{Número Servicios Averiadados}}{\text{Número Total de Servicios}} \times 100$$

Ecuación 4: Incidencia de averías en la interrupción de los servicios

El número de paradas por mantenimiento es otro indicador a seguir. Este no requiere un cálculo específico, aunque debe considerarse que esto incluye tanto las paradas planificadas como las no planificadas. Este indicador, sin embargo, es genérico por lo que se requiere de otros indicadores descritos de cara a cuantificar el impacto específico de estas paradas.

### Fiabilidad

La fiabilidad en el mantenimiento de trenes es un requisito necesario para poder garantizar la eficiencia, la seguridad continuada de los activos y, en consecuencia, satisfacción general del servicio y su disponibilidad.

Dentro de la fiabilidad ya podemos encontrar en la literatura el primer KPI que recaería dentro del diagrama de Venn descrito anteriormente y sería la eficiencia operativa. La eficiencia operativa a efectos prácticos resulta ser el mismo KPI que la disponibilidad operativa que también se podría considerar un KPI de fiabilidad.

El porcentaje de paradas no programadas es un indicador clave en el mantenimiento de los trenes ya que mide en que medida las paradas son consecuencia de fallas inesperadas y por tanto permite medir la fiabilidad del mantenimiento y la robustez de los programas y predicciones realizadas.

Un bajo porcentaje indica que los servicios de mantenimiento se han realizado adecuadamente y que se han anticipado las fallas naturales de la operación. Sin embargo, un porcentaje alto señala a problemas que requieren solución tanto en la operación de los activos ferroviarios como por la eficacia del mantenimiento. El estudio de los valores promedio de la industria y la monitorización constante de este indicador es de gran utilidad para tomar medidas a reducir las paradas no programadas y mejorar la disponibilidad del servicio.

La fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$\begin{aligned} & \% \text{ Paradas No Programadas} \\ &= \frac{\text{Número Paradas no Programadas}}{\text{Número Total de Paradas}} \times 100 \end{aligned}$$

### Ecuación 5: Porcentaje de Paradas no Programadas

El número de paradas no programadas en la operación del tren se debe fallos imprevistos durante el tiempo de operación del tren. En este caso el número de paradas no programadas y su relación con el total es de gran interés por las causas que lo generan.

Durante el transcurso del análisis de los métodos novedosos para mejorar el mantenimiento ferroviario se puede ver el efecto sobre estas causas, aunque también se debe considerar que existen muchas causas exógenas al mantenimiento que influyen en la falla no programada de los trenes. Desgaste y envejecimiento, problemas técnicos, fallas en los equipamientos auxiliares del tren, errores humanos y problemas en la infraestructura son algunos problemas que, aunque solo indirectamente influenciados por el mantenimiento, una monitorización eficaz y adecuada en conjunto con mantenimiento predictivo y preventivo puede reducir en gran medida.

Para la fiabilidad se debe analizar el tiempo medio entre fallas ya que este permite parametrizar la eficacia de mantenimientos previos y establecer estándares de mejora sobre los que identificar problemas no detectados en el equipamiento. Este indicador ya se ha descrito anteriormente para la disponibilidad, aunque su impacto también se encuentra en la disponibilidad.

La fiabilidad se puede medir a través de las variaciones en la efectividad en el transporte de carga y su parametrización en comparación con el estándar habitual. Esta fiabilidad se puede analizar en la medida deseada dependiendo de la función del análisis por su cantidad de carga en volumen, peso o valor económico entre otros.

El indicador se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} & \textit{Efectividad del transporte de carga} \\ & = \frac{\textit{Carga Transportada con Éxito}}{\textit{Carga Total Planificada}} \times 100 \end{aligned}$$

Ecuación 6: Efectividad del Transporte de Carga

La efectividad del transporte de carga en trenes proporciona una medida de la eficacia del transporte. Este indicador permite detectar a su vez mejoras en la operación por detección rápida de indicaciones de fallas, una planificación del mantenimiento adecuada y un resultado adecuado del mantenimiento que mejore la fiabilidad del tren en su servicio.

El porcentaje de mantenimiento correctivo sobre el total es un indicador necesario dentro del análisis de la fiabilidad del mantenimiento, la capacidad para predecir fallas y los programas de mantenimiento existentes ya que permite la identificación del porcentaje de fallas no planeadas por su valor económico. Al recoger el KPI como valor de la incidencia de los mantenimientos correctivos sobre el total se asimila al número de paradas no programadas.

La fórmula que define este indicador es la siguiente:

$$\% \text{ Mantenimiento Correctivo} = \frac{\text{Mantenimiento Correctivo}}{\text{Mantenimiento Total}} \times 100$$

Ecuación 7: Porcentaje de mantenimiento correctivo

## Costes

Los costes vinculados al mantenimiento son muchos y un estudio profundo por parte de las empresas vinculadas las define, por su incidencia como variables de coste influyente [IDRIS22]:

- Coste de componentes de reemplazo
- Costes asociados al ciclo de vida del tren
- Costes provenientes del el ordenamiento de los vagones (Shunting)
- Costes provenientes del mantenimiento preventivo
- Costes provenientes de la mano de obra
- Costes provenientes del mantenimiento correctivo
- Costes provenientes del inventario
- Costes provenientes de las inspecciones
- Costes provenientes del equipamiento y la maquinaria

- Costes provenientes de la logística
- Costes provenientes de la reparación
- Costes por la depreciación de los activos
- Coste de oportunidad por los tiempos de avería
- Costes de adaptar la flota a condiciones nuevas
- Coste del entrenamiento de la mano de obra
- Coste de penalizaciones legales
- Coste del seguro

Todos estos costes cuentan con sus propios análisis relevantes y pueden segmentar la elección de indicadores de manera muy granular. Sin embargo, para el análisis de las medidas a emplear y por reducir el horizonte del análisis se han decidido unos indicadores más restringidos al estudio de las medidas.

La reducción del coste de mantenimiento correctivo es una de las prioridades del mantenimiento ferroviario y su planificación adecuada. De la revisión de la literatura se pueden conseguir valores en relación con el peso específico del coste correctivo respecto al preventivo tales como distribución por regla de Pareto. Sin embargo, para la consecución de este estudio el coste del mantenimiento correctivo se divide en componentes genéricos que se pueden trazar desde los diferentes métodos estudiados.

A través de la siguiente ecuación se pueden estudiar los efectos de los costes del mantenimiento correctivo:

### *Coste Total Mantenimiento Correctivo*

$$\begin{aligned} &= \text{Coste de Piezas de Repuesto} + \text{Coste de Mano de Obra} \\ &+ \text{Coste Auxiliar de Reparación} \\ &+ \text{Costes de Oportunidad por Inactividad} \end{aligned}$$

Ecuación 8: Coste Total Mantenimiento Correctivo

El Coste de las Piezas de Repuesto dentro del mantenimiento correctivo debe comprender el acceso a las piezas de repuesto necesarias tras una avería no planificada. Estos costes deben considerarse tras un estudio previo de los componentes afectados y

pueden incluir costes derivados de piezas como motores, sistemas de frenos, componentes electrónicos, y cualquier otro elemento específico del tren que requiera sustitución.

El Coste de Mano de Obra debe incluir los costes asociados a las horas requeridas por los trabajadores de mantenimiento involucrados en las operaciones de mantenimiento.

El Coste Auxiliar de Reparación en el mantenimiento correctivo de trenes incluye todos aquellos costes auxiliares dentro de la operación de reparación que no incluyan las piezas de repuesto o la mano de obra. Ejemplos de estos costes pueden ser el transporte de los técnicos hasta el lugar de la avería, gastos asociados al almacenamiento temporal del tren fuera de servicio, alquiler de equipo especializado, y la disposición adecuada de residuos o materiales retirados durante la reparación. La consideración de estos costes auxiliares es esencial para obtener una visión completa de los recursos involucrados en el proceso de mantenimiento correctivo.

Para encontrar indicadores vinculados al mantenimiento preventivo en trenes se deben comprender los diversos elementos integradores de este tipo de mantenimiento y su naturaleza. La implementación efectiva de inspecciones regulares, mantenimiento programado y sustituciones anticipadas de componentes desgastados son necesarias para contribuir a un mantenimiento preventivo eficaz. Con ello y tratando de simplificar los impactos de los mecanismos estudiados se puede abordar el mantenimiento preventivo mediante la siguiente ecuación:

### *Coste Total Mantenimiento Preventivo*

$$\begin{aligned} &= \text{Coste de Inspeccion} + \text{Coste de Mantenimiento} \\ &+ \text{Coste de Piezas de Repuesto Preventivas} \\ &+ \text{Costes por Inactividad} \end{aligned}$$

Ecuación 9: Coste Total Mantenimiento Preventivo

El Coste de Inspecciones y Revisiones abarca los recursos dedicados a la evaluación regular del tren, anticipando posibles problemas. Estas inspecciones, llevadas a cabo de manera sistemática, permiten identificar desgastes prematuros, detectar componentes susceptibles a fallas y evaluar el estado general del tren.

El Coste de Mantenimiento del mantenimiento preventivo incluye las operaciones programadas desarrolladas en anticipación de roturas de componentes. Estas operaciones planificadas abarcan actividades variadas desde la lubricación hasta la sustitución proactiva de partes desgastadas.

El Coste de las Piezas de Repuesto para el mantenimiento preventivo refleja la inversión necesaria derivada de las piezas de repuesto para conseguir la consecución del mantenimiento preventivo.

El Coste por Inactividad en el mantenimiento preventivo, a diferencia del Coste de Oportunidad por Inactividad del mantenimiento correctivo, incluye los costes vinculados a la falta de disponibilidad del tren de cara a sus paradas programadas. Este coste por tanto puede incluir pérdida de ingresos por servicios no prestados durante el tiempo de inactividad programado, costes adicionales asociados a reprogramaciones de servicios, y posibles penalizaciones contractuales por incumplimiento de los tiempos de operación planificados, en casos excepcionales.

El coste de mantenimiento predictivo es un coste de utilización novedosa. No por ello no se debe incluir algunos parámetros que nos permitan identificar cuáles son sus vehículos de coste. El mantenimiento predictivo se debe entender como el uso de tecnologías de estudio de datos masivos que permite anticipar posibles fallas y realizar intervenciones específicas a los vehículos y su condición. A diferencia del mantenimiento preventivo, que utiliza plazos predeterminados por la tipología de las piezas, el predictivo se adapta a las condiciones reales del equipo, optimizando los recursos y reduciendo los costes asociados a intervenciones innecesarias o anticipándose a averías.

Este coste se puede resumir mediante la siguiente ecuación:

*Coste Total Mantenimiento Predictivo*

$$\begin{aligned} &= \text{Coste de Sensorización} + \text{Coste de Mantenimiento} \\ &+ \text{Coste de Piezas de Repuesto} + \text{Costes por Inactividad} \end{aligned}$$



### Ecuación 10: Coste Total Mantenimiento Preventivo

Los Costes derivados del estudio de datos más preciso a través de sensores representan la diferencia principal con el mantenimiento preventivo. La sensorización de los trenes además de su integración en aplicaciones de gestión de información adecuada en tiempo real permiten el uso de algoritmos avanzados que pueden anticiparse a las fallas o retrasar los mantenimientos programados. Es de gran importancia realizar un estudio previo del historial de roturas previo para poder dar los datos masivos para el estudio.

Al estudiar variables de costes se debe, adicionalmente, estudiar una variable mencionada anteriormente dentro de los indicadores típicos de la disponibilidad el cuál es el impacto indirecto de un mantenimiento no suficientemente adecuado en los costes indirectos que sufre la operadora ferroviaria a raíz de los servicios interrumpidos.

Para ese análisis se puede incluir la siguiente ecuación:

#### *Costes Indirectos de Interrupción*

$$\begin{aligned} &= \text{Costes Indirectos por Litigaciones} \\ &+ \text{Costes Indirectos por Congestión} \\ &+ \text{Costes Indirectos por Daño de Infraestructuras} \end{aligned}$$

#### Ecuación 11: Costes indirectos por interrupción de servicios por averías

Los costes indirectos por las litigaciones provienen principalmente de las reclamaciones a las que tienen derecho los diferentes clientes de las operadoras, aunque también existen impactos reputacionales de estas litigaciones con efecto en la rentabilidad más difícil de medir. Estas litigaciones incluyen honorarios legales, costes judiciales, indemnizaciones a terceros afectados, y otros gastos relacionados con la resolución de disputas legales derivadas de los daños causados por la rotura de trenes.

## Medioambiente

El consumo de energía dentro del mantenimiento ferroviario es uno de los indicadores más relevantes por su visibilidad y escala. Este consumo debe comprenderse por los diferentes consumos principales dentro de la operativa del mantenimiento ferroviario. Con la identificación y evaluación detallada de cada uno de estos componentes de consumo energético se pueden implementar estrategias específicas de eficiencia energética eficaces.

La maquinaria utilizada en el mantenimiento, como vehículos de inspección, trenes de trabajo y equipos de soldadura, demandan una cantidad significativa de energía que puede mejorarse mediante técnicas de eficiencia. A su vez, las instalaciones en las que se realiza el mantenimiento, como talleres y depósitos, también juegan un papel crucial en este indicador a través de los sistemas de iluminación y climatización.

Por último, también se deben considerar los costes energéticos indirectos que se generan a través del mantenimiento bien hecho por la degradación menos pronunciada de las condiciones técnicas del equipamiento y la simplificación de la logística por no provocarse una avería no anticipada entre otros.

Con el objetivo de medir el coste energéticos de las operaciones de mantenimiento se debe establecer un indicador que permita saber el impacto específico de las operaciones realizadas. Por su simplicidad, pero también por eliminar los efectos lesivos de escalas se opta por una variable de media de coste energético por unidad relevante de operación.

### *Consumo Energía Medio Mantenimiento*

$$= \frac{\text{Consumo Total Energía}}{\text{Número Servicios Mantenimiento}} \times 100$$

Ecuación 12: Consumo energético medio por operaciones de mantenimiento

La simplicidad del indicador permite casar los costes medios con otros indicadores principales para detectar cuales son los métodos y actividades particulares más adecuados de cara a simplificar la operación y reducir el consumo.

El porcentaje de consumo de energía renovable es uno de los indicadores principales en el impacto medioambiental de las operaciones industriales. En el caso del mantenimiento ferroviario existen toda una serie de actividades que permiten una eficiencia en el consumo energético que permita mandar señales al mercado para favorecer la generación de energía renovable.

$$\text{Consumo Energía Renovable} = \frac{\text{Consumo Energía Renovable}}{\text{Consumo Total Energía}} \times 100$$

#### Ecuación 13: Consumo energía renovable

El consumo de energía renovable se puede asegurar a varios niveles. Desde el punto de vista de mercado mediante la compra de certificados que permitan trazar esa energía a las fuentes renovables y rentabilizar la inversión en energías limpias a permitir consumos de energía dinámicos que favorezcan las características estructurales de las energías renovables.

Es además importante tener en consideración el rol del autoconsumo en el consumo de energía renovable por las grandes extensiones vinculadas a los parques de mantenimiento de las flotas ferroviarias. En el caso de este indicador, y con el objetivo de simplificar, se recomienda el uso de la energía proveniente del autoconsumo como energía renovable consumida a pesar de que la legislación y mecanismos de venta específicos de cada región puedan hacer que a la hora de reportar o contabilizar este indicador se deba llevar a cabo de una manera diferente.

El equipamiento de mantenimiento ferroviario incluye mucha maquinaria, instalaciones y equipamientos auxiliares que generan emisiones. Se pueden entender las emisiones activas del equipamiento como la liberación directa de gases y partículas al ambiente

durante su funcionamiento de la combustión de combustibles en motores, sistemas de calefacción, o procesos industriales.

### *Emisiones por Mantenimiento*

$$= \frac{\text{Emisiones Totales GHG}}{\text{Número de Mantenimientos}} \times 100$$

Ecuación 14: Emisiones por mantenimiento

Las emisiones de efecto invernadero por mantenimiento recogen las emisiones derivadas de las operaciones de mantenimiento.

### Seguridad y Bienestar

La seguridad y el bienestar de los trabajadores es una de las prioridades dentro del mantenimiento ferroviario debido a su importante impacto social y humano y por su importancia para conseguir solucionar los problemas considerables de atracción y retención de capital humano dentro del sector ferroviario. El entorno seguro dentro del sector ferroviario es vital para mantener la salud de los trabajadores y la imagen de la industria.

El indicador principal dentro de los sectores industriales es el índice de accidentes laborales. Este índice refleja la incidencia de los peores fallos dentro de la política de seguridad y bienestar de una empresa y se pueden dar por medidas de seguridad deficientes, entrenamiento de los trabajadores insuficiente y fallos en los protocolos de emergencia. La ecuación que describe este indicador es la siguiente

### *Índice de Accidentes Laborales*

$$= \frac{\text{Número Accidentes Laborales}}{\text{Número de Horas Trabajadas}} \times 100,000$$

Ecuación 15: Índice de Accidentes Laborales

Los accidentes laborales representan todos los incidentes que ocurren en el mantenimiento ferroviario incluyendo caídas, atrapamientos y exposición a sustancias peligrosas, entre otros. Estos incidentes pueden variar en gravedad e incluyen desde lesiones menores hasta eventos de gravedad que resultan en daños severos para los trabajadores.

El estándar de medida como unidad por cada 100,000 es muy utilizado en la literatura y estudios relevantes de organizaciones sindicales [UGT22] y este se puede clasificar tanto por trabajadores como por horas de manera que se adapte a la escala del estudio de las instalaciones específicas.

El tiempo medio de respuesta ante emergencias es otro indicador de uso habitual en el mundo industrial y afecta de manera relevante a la gravedad de los incidentes y los tiempos esperables en su resolución y el retorno en el desarrollo de la operación habitual. Factores que afectan a un tiempo medio de respuesta ante emergencias pueden ser la eficacia de los protocolos de seguridad, la disponibilidad y acceso a equipos de respuesta, la capacitación del personal, y la calidad de la comunicación interna. La siguiente ecuación se puede emplear para medir este indicador:

$$\begin{aligned} & \textit{Tiempo Medio de Respuesta ante Emergencias} \\ & = \frac{\textit{Tiempo Total de Respuesta}}{\textit{Número Total de Emergencias}} \end{aligned}$$

Ecuación 16: Tiempo Medio de Respuesta ante Emergencias

Al considerar la longitud de una respuesta ante una emergencia se debería considerar el período total entre la detección inicial del incidente y la completa resolución y retorno a las operaciones normales. Este período abarca desde el momento en que se identifica la emergencia hasta que se implementan todas las medidas necesarias, se realiza la mitigación de riesgos, se lleva a cabo la recuperación y se restablece por completo la operación regular

De cara al desarrollo del capital humano en el mantenimiento ferroviario existen muchos indicadores para medir y monitorizar el impacto de los factores estudiados. Sin embargo, el enfoque se va a simplificar a representar la productividad de los empleados además del entrenamiento continuo de los mismo.

El porcentaje de cumplimiento del programa establecido para el mantenimiento preventivo como indicador de productividad de los empleados es muy utilizado dentro del mantenimiento ferroviario. Este demuestra la adherencia de los trabajadores a los horarios organizativos establecidos. Dentro de la industria, existen una serie de razones por las que los trabajadores pueden no llegar a completar los mantenimientos programados, se deben incluir limitaciones de tiempo, falta de recursos adecuados para completar los mantenimiento, imprevistos operativos durante el transcurso, y la necesidad de priorizar tareas críticas.

Es por ello por lo que la medición de este indicador proporciona una visión valiosa sobre la eficiencia operativa de las tareas para las que se realizan los entrenamientos que aportan capital humano y la capacidad de los empleados para seguir las planificaciones establecidas. Se puede hacer a través de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \textit{Porcentaje de Cumplimiento Mantenimiento Preventivo} \\ & = \frac{\textit{Mantenimiento Realizado}}{\textit{Mantenimiento Programado}} \times 100 \end{aligned}$$

Ecuación 17: Porcentaje de cumplimiento de mantenimiento preventivo

Por último, se ha seleccionado un indicador de capital humano enfocado en el desarrollo de las habilidades laborales mediante entrenamiento. En este aspecto existen una infinidad de indicadores que reflejan el nivel de adherencia, porcentaje de personal cualificado y porcentaje en el que se hayan completado los programas de entrenamiento. Sin ninguna consideración partículas se incluye el porcentaje de participación en los programas de desarrollo laboral como horas. Se puede estudiar con la consiguiente ecuación:

### *Porcentaje de Desarrollo Laboral*

$$= \frac{\textit{Horas de Entrenamiento Realizadas}}{\textit{Horas de Entrenamiento Planeadas}} \times 100$$

Ecuación 18: Porcentaje de horas de entrenamiento completadas

Con el porcentaje de desarrollo laboral como porcentaje de horas completadas sobre las horas planteadas se puede llevar a cabo un análisis dentro del taller de como se encuentran los trabajadores al día para las labores de mantenimiento vinculadas con equipamiento más novedoso.

Los programas de entrenamiento deben permanecer como un componente integral del mantenimiento y requieren de monitorización constante. El incremento del capital humano en el mantenimiento es de especial importancia considerando que instituciones como Deloitte prevén que en Estados Unidos existirá en la industria una falta de 2,1 millones de trabajadores cualificados para 2030 [DELOITTE22]. Los trabajadores requeridos por la industria por tanto no se podrán esperar encontrar en el mercado laboral, sino que serán necesarias campañas de reclutamiento y de entrenamiento adecuadas para adaptarse a esta situación





# Tecnologías y Soluciones Verdes

El desarrollo de tecnologías verdes en el mantenimiento ferroviario es de gran importancia ya que representa la viabilidad a largo plazo de este sector. Su puesta en prioridad por la Unión Europea además del progresivo reemplazo de las flotas mundiales por locomotoras con menores emisiones demuestra un horizonte de posibilidades en las que la prioridad de la sostenibilidad se contempla.

En este proceso de transición es importante destacar el impacto de las siguientes tecnologías y soluciones ecológicas en la mejora de la eficiencia, la seguridad y la reducción de costes [RSM&DO23].

La iluminación de bajo consumo a través de LED ha sido muy estudiada dentro de la implementación en el sector ferroviario durante la última década. La iluminación LED consigue disminuir más de la mitad los costes de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con los sistemas anteriores con lo que ya representa una buena medida de reducción de huella de carbono [HITACHI12].



Figura 10: Iluminación LED en el interior de un vagón [ST21]

En adición a los ahorros de los costes energéticos y de emisiones de CO<sub>2</sub>, la implementación de iluminación LED en los trenes elimina los problemas de parpadeo de la luz fluorescente y no emite rayos ultravioletas. Esto permite la mejora de la experiencia del usuario al proporcionar una iluminación más estable y agradable. La ausencia de parpadeo reduce la fatiga visual y contribuye a un entorno más cómodo para los pasajeros y para los trabajadores que realizan sus labores a bordo. Asimismo, al no emitir rayos ultravioletas, se minimiza el riesgo de daño a materiales sensibles y se crea un ambiente más seguro y saludable. En el caso de RENFE se anunció adaptar los sistemas de iluminación LED a los trenes con ahorros esperados de energía del 75% en la iluminación [RENFE23]

Los dispositivos de ahorro energético dentro de las soluciones tecnológicas verdes se pueden ver con el desarrollo de convertidores con carburo de silicio (SiC). Como parte de la iniciativa europea del Shift2Rail se han desarrollado unos convertidores con un ahorro energético del 10% del consumo total del tren que se espera que lleguen a mercado en 2024. Los ahorros energéticos dependen del tipo de tren en el que se implemente el dispositivo.

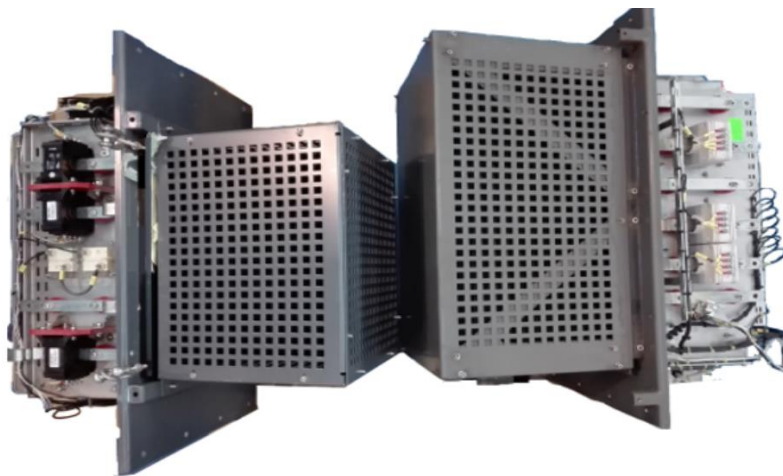


Figura 11: Sistemas desarrollados en el marco Shift2Rail [RR19]

El dispositivo se está adaptando a su vez para incluir todo tipo de desarrollos modernos en mitigación de ruido en la refrigeración de los componentes e incluyen sistemas de monitorización para poder determinar la salud de los componentes y reducir sus costes de mantenimiento, operación y alargar su vida útil.

La monitorización y la gestión eficiente de la energía de los sistemas de energía en el sector ferroviario es una práctica desarrollada. Compañías como ABB y Hastler venden todo tipo de dispositivos para la medición de corrientes y tensiones en arquitecturas complejas en el tren o exterior. Además, también incluyen la publicación de los sistemas propios de rastreo tecnológico de estos parámetros y su uso para ajustarlo a las demandas relevantes.

“Las empresas ferroviarias en Europa han declarado objetivos de que instalarán Sistemas de Medición de Energía en todas las unidades de tracción donde sea técnica y económicamente viable, lo que debería resultar en la medición del 60% de todos los vehículos de tracción para 2025 y el 90% para 2030” [MALGORZATA21].

Llevar a cabo la instalación de sistemas de medición eléctrica para la flota de trenes permite beneficios para el operador de trenes y para la compañía energética por una mejor capacidad para responder a las limitaciones de la demanda. Sin embargo, estas instalaciones añaden complejidad a las labores de mantenimiento para mantener los sistemas de medición en funcionamiento adecuado además de una inversión inicial. Esta monitorización añade la importancia de un personal cualificado dentro del mantenimiento ferroviario, aunque su instalación facilita también las labores de detección de fallas en casos de sobretensiones o componentes que no reciben corriente.

La implementación de trenes híbridos con baterías aumenta la flexibilidad del sistema al darle la posibilidad a los trenes de desplazarse con autonomía completa sin infraestructura eléctrica. Representa por tanto una tecnología transicional que evita las emisiones de carbono en operación en vías de la red que no han podido ser aún actualizadas al tren eléctrico. Desde Hitachi han desarrollado esta tecnología con la visión de ser modular por lo que se puede realizar la instalación en los techos de vagones existentes los cuales requerirán de un trabajo de mantenimiento para compatibilizar el sistema de tracción con uno eléctrico [HITACHI23].

El uso de las baterías tiene a su vez otra serie de beneficios en torno a la carga y la adquisición de las materias primas. Por un lado, la escala relativamente pequeña de las baterías de trenes en comparación con las utilizadas en BESS permiten un grado de reutilización y reciclado de baterías que reduce costes y emisiones. Además, el uso de las baterías permite una reducción en costes considerables al dar flexibilidad a la red energética durante la carga, lo que favorece la carga en horas de alta generación renovable, ayudando a la red a estabilizarse.



Figura 12: Trenes regionales híbridos con baterías de Hitachi [HITACHI23]

La flota de Hitachi de trenes con uso de baterías declara que tanto para los sistemas híbridos entre batería y eléctrico como batería, eléctrico y diésel consiguen ahorros en el consumo de combustible del 50%, reducen sus emisiones de contaminación acústica y reducen sus tiempos de tránsito. En consideración de los beneficios de reducción de congestión y de aumento de la disponibilidad deben considerarse como idóneos el recurso a cursos de formación para permitir realizar la adaptación en la planta adecuada de mantenimiento de flotas de trenes a trenes híbridos con baterías.

Otra solución verde innovadora relacionada con el sector ferroviario es el uso de trenes con motores de hidrógeno. El uso de hidrógeno como reemplazo para el gas es una tecnología que está alcanzando la madurez de mercado con gran apoyo institucional y costes en reducción de instalación y operación. Esta reducción de costes en su vertiente de hidrógeno verde sin embargo no es suficiente para competir con su contraparte generada a través de gas natural sin la intervención de instituciones reguladoras. A nivel de construcción de plantas a nivel europeo se está llevando a cabo una labor de expansión de la infraestructura gasista para adaptarse al transporte de hidrógeno además de la reconversión de cuevas históricas en almacenes temporales.

Los beneficios del uso de trenes de hidrógeno se pueden ver principalmente en su funcionamiento similar al de trenes diésel y por tanto su capacidad de uso de las infraestructuras históricas de tránsito ferroviario.

Por otro lado, aunque no requieran de infraestructura específica como el tren eléctrico también cuentan con desventajas clara. La infraestructura de hidrógeno no se encuentra suficientemente desarrollada de la misma manera que su producción está desarrollando tímidamente debido a la inseguridad en la demanda que se pueda esperar. Además, el uso de gases de alta presión requiere un sistema específico para almacenar y extraer ese hidrógeno, aumenta considerablemente los efectos dañinos en caso de una falla del tren y aumenta los costes en preparación de los trabajadores y diseñadores cualificados para operar esta tecnología [AICH22].

Una de las labores relevantes dentro del mantenimiento de los trenes es la limpieza de estos tanto entre operaciones como durante el mantenimiento por fallas. En este aspecto del mantenimiento se ha estudiado la aplicación de robots de limpieza. Su comercialización se encuentra en proceso, pero ya se encuentran diseños conceptuales con las prioridades que se deben establecer en las dificultades de operación por la limitación de espacio en los lugares de operación. Los robots están diseñados de manera complementaria para poder realizar las labores de barrer, recoger y aspirar, aunque el estudio radica en la capacidad del robot con cinta automática de realizar la limpieza mejor que el resto [WESTERN21].

La instalación de frenadas regenerativas en los trenes permite el ahorro de entre el 6% y el 40% de energía durante la frenada dependiendo de la velocidad y tipo de tren en uso [RENFE23]. La frenada regenerativa funciona de manera que en vez de disipar la energía de la frenada en calor los motores hacen la función de generador devolviendo la energía cinética de la frenada a la red o a sistemas del tren que puedan aprovecharse de esta energía.

A nivel de mantenimiento este mecanismo añade complejidad a la operación en el taller ya requiere de la monitorización y cualificación para el mantenimiento de un componente extra dentro de la operativa del tren. La aplicación del sistema regenerativo según otro estudio llega al 18% de la energía cinética del tren, pero propone grandes limitaciones para integrar los equipos a la arquitectura existente además de tener que adaptar el sistema al operador del tren [MARIANI22]. Esto implica del lado del mantenimiento la necesidad de una mayor integración, disponibilidad de piezas y monitorización adecuada para facilitar la implementación de este equipamiento que permite ahorros energéticos considerables.

De cara a la integración de sistemas de energía renovable la infraestructura ferroviaria es ideal para acomodarlo. En Italia Ferrovie dello Stato ha dispuesto los espacios de sus estaciones y áreas de soporte para su uso como localizaciones para colocar paneles

solares. En Finlandia la gestión del consumo de energía de la planta de mantenimiento “Pendolino” se realiza en un 25% gracias a la instalación 2,264 paneles solares en los espacios de la propia instalación del depósito de trenes. Debido a las condiciones particulares de la energía solar su producción no casa con la demanda de la planta pero a efectos prácticos la red opera como una batería virtual para el consumo interno [RN21].

# Contratos de Mantenimiento

Para entender la temática del mantenimiento ferroviario es importante considerar los contratos de mantenimiento sobre los que se opera en la actualidad y sus especificaciones a nivel de operación y de costes.

Los contratos de mantenimiento se pueden entender como los contratos definidos entre dos contrapartes para el mantenimiento de los activos ferroviarios, aunque son comunes en todas las industrias. El mantenimiento se extiende desde activos como las instalaciones, las soluciones tecnológicas aplicadas para la monitorización, los sistemas auxiliares del tren, componentes mecánicos y cualquier equipamiento relevante para la operación. Es también importante resaltar que la dinámica de los contratos de mantenimiento no es la única ya que se puede optar por realizar todas las tareas de operación internamente. Este análisis de la tipología de los contratos puede por tanto ser de mayor utilidad para empresas que traten de externalizar sus servicios o para fondos de infraestructuras que buscan conseguir maximizar los retornos de su inversión.

Las consideraciones primarias para optar por los contratos de mantenimiento resultan de su aplicación a todas las tareas necesarias para el mantenimiento de los trenes. Los contratos de mantenimiento pueden cubrir todos los tipos de mantenimiento descritos durante el trabajo entre los que se incluyen los mantenimientos rutinarios, correctivos y preventivos o basados en las condiciones del equipamiento.

Adicionalmente los contratos de mantenimiento también se caracterizan por extenderse a los equipamientos particulares homologados de los vehículos como equipos de carga, prevención de incendios, sensores y detectores de diferente naturaleza. A su vez también es de uso extendido para tareas muy especializadas como el control de plagas, tratamiento de aguas, mantenimiento de los equipamientos de refrigeración y otros mantenimientos derivados de las instalaciones auxiliares de los trenes como las cafeterías o las cocinas.

Los departamentos de mantenimiento de las diferentes empresas es el encargado de encontrar el enfoque adecuado a nivel de tipos de contratos y proveedores adecuados. Además, el contrato debe englobar de manera eficiente cual es el alcance del trabajo deseado de cara a minimizar los costes y evitar que partes del proceso no sean consideradas.

Un departamento de mantenimiento eficiente a su vez debe hacer seguimiento constante de la eficacia de los servicios dados y la calidad de estos. Chequeos sobre potenciales alternativas en los términos del contrato o de proveedores además de las áreas de trabajo que deben ser accesibles a los terceros contratados. Otras consideraciones relevantes de cara al adecuado funcionamiento de la empresa es la monitorización de los comportamientos de los trabajadores y consideraciones relevantes en materia de seguridad de los equipos y de los empleados encargados de su mantenimiento.

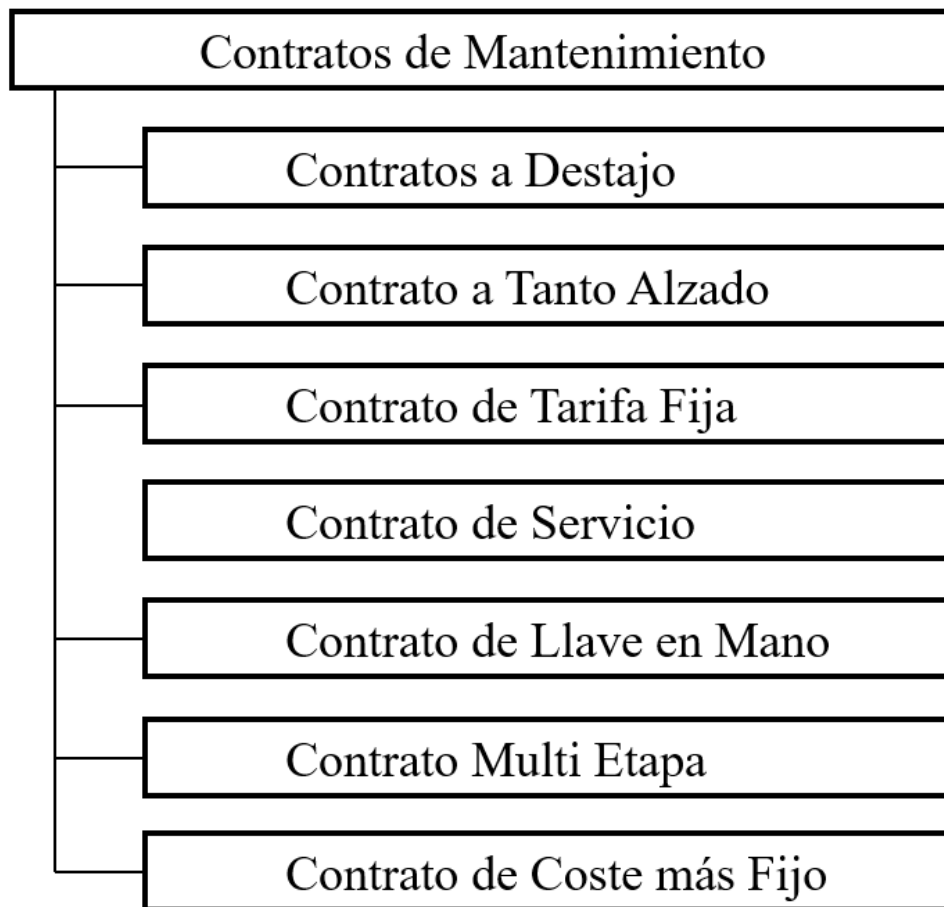


Figura 13: Tipos de Contratos de Mantenimiento

Los tipos de contrato de mantenimiento son varios y merecen de una exploración simplificada para poder ver cual es su aplicación y cuales son los perímetros que se pueden considerar. A nivel de aplicación las consideraciones específicas de los contratos de mantenimiento no suelen ser reveladas por las compañías ya que representan información confidencial de la contratación. Sin embargo, tras la explicación de los



diferentes tipos de mantenimiento y sus ventajas se procederá a enumerar contratos de mantenimiento recientes y de escala contratados por las principales operadoras de trenes para permitir una visión más completa de la caracterización de los contratos de mantenimiento ferroviario.

El primer tipo de contrato se refiere a los contratos a destajo o por piezas. Este tipo de mantenimiento se refiere a un acuerdo contractual con un pago vinculado a tareas específicas de mantenimiento. La compensación por tanto se encuentra vinculada a las tareas específicas y por tanto no tienen en cuenta el horizonte temporal.

La flexibilidad en el tiempo de aplicación de los servicios contratados permite que el foco de la tarea sea la calidad a cumplir del servicio. Por otro lado, al vincular el trabajo realizado a la remuneración se generan incentivos para mejorar la eficiencia y la productividad en la ejecución de las tareas relevantes.

Este tipo de contrato resulta adecuado para las tareas a realizar que estén caracterizadas por ser unidades discretas y claramente diferenciables tales como la reparación de componentes específicos. Los riesgos y beneficios son compartidos por las dos partes ya que los ingresos se pueden aumentar con un mejor desarrollo de las tareas, pero también se pueden demorar.

El segundo tipo de contrato son por tanto alzado (Lump Sum). En los contratos por tanto alzado el acuerdo contractual especifica un remuneración fija para la ejecución de un conjunto de tareas y servicios de mantenimiento. Los costes de la operación se encuentran predefinidos y por tanto no se ve afectado de manera variables por los costes reales de las operaciones de mantenimiento que lleve a cabo la parte contratada.

Es característico por tanto de este contrato la certidumbre financiera que se genera al estar claro el coste total que trasladará el proveedor desde la firma del contrato. Sin embargo, esta estabilidad del presupuesto debe manejarse de manera delicada ya que puede verse afectado negativamente por la complejidad de la tarea que pueda dejar áreas grises para el proveedor que justifiquen reducciones del alcance y de sus costes propios.

El contrato en sí favorece la eficiencia de costes por parte del proveedor y requiere necesariamente de un detalle suficiente de los estándares a alcanzar deseados y es idóneo para tareas claramente sencillas o con comprensión estándar de los resultados que se

pueden desear. De otra manera se pueden encontrar desventajas en las eficiencias escogidas por el proveedor.

El tercer tipo de contrato, de tarifa fija, se encuentra en concepto bastante vinculado al de tanto alzado, aunque su aplicación difiere. El contrato por tarifa fija vincula un coste fijo a una serie de servicios a realizar durante un periodo de tiempo, normalmente de un año.

La tarifa fija acordada se suele abonar con intermitencia mensual, anual o en intervalos regulares acordados previamente. A su vez aporta seguridad sobre los costes incrementales del proveedor ya que a diferencia del coste del tanto alzado que se agrupa para la consecución de una serie de tareas este fija los costes para un periodo de tiempo con tareas que pueden ocurrir durante el total del periodo.

El contrato también se caracteriza por la flexibilidad que da a nivel de la cantidad de trabajo por contratar. La tarifa fija establece el coste para las actividades acordadas pero su aplicación es variable en términos de cuanto trabajo acabar contratando. La tarifa fija también favorece la visibilidad de los costes a futuro por la transparencia del contrato durante el intervalo de tiempo acordado.

Para este tipo de contrato, al igual que en los contratos de tanto alzado, es idóneo que las tareas a realizar estén claramente delineadas en tanto a la calidad de las tareas como la cantidad de trabajo vinculado a estas. Además, por su naturaleza favorece la eficiencia en los costes de las operaciones de mantenimiento por parte del proveedor de manera continua ya que el riesgo de evolución de costes recae completamente sobre este.

El cuarto tipo de contrato engloba los servicios preventivos y planeados de mantenimiento típicamente esperables durante una ventana de tiempo en torno al año. Contratos de mantenimiento de equipamiento complejo específico como los motores son característicos de este tipo de contrato.

A diferencia de tipos de contrato anteriores en este tipo de contrato se favorece la especialización del proveedor en el mantenimiento de un equipo específico y por tanto el contrato se realiza sobre los servicios fijos vinculado a este equipamiento.

El quinto tipo de mantenimiento, de muy común aplicación en el mercado, es el de llave en mano. Los contratos de llave en mano son característicos por aplicarse sobre una serie de tareas a realizar desde cero hasta que la naturaleza del proceso ya esté preparada para operación habitual.

En los casos industriales este proceso suele estar relacionado con compras de equipamiento nuevo sobre los que se debe de construir todos los procesos de mantenimiento y protocolos. El proceso debe englobar todas las fases desde la planificación, ejecución, gestión de recursos y la entrega final de los servicios por lo que los procesos suelen ser gestionados por firmas con experiencia extensiva en el desarrollo de estos procesos en proyectos totalmente nuevos.



Figura 14: Siemens consiguió el contrato de llave en mano para trenes de alta velocidad en Egipto [SIEMENS21]

La responsabilidad integral asumida por el proveedor para las inspecciones, reparaciones y la gestión de los recursos permite una mejor gestión de los riesgos por parte de las partes interesadas en estos contratos.

Estos contratos suelen ser de gran escala al estar vinculados con la puesta en marcha de sistemas ferroviarios desde cero. La entrega de los servicios completos está considerada

y es común que con el propio contrato de llave en mano se incluya el mantenimiento prolongado más allá de la puesta en marcha.

Se detallan además de los servicios a realizar la tarifa global esperable por los servicios completos, incluyendo los de mantenimiento, mano de obra, aprovisionamiento de los materiales y otros.

Los plazos de entrega claros son indispensables para una adecuada realización del proceso además de garantías de desempeño que permitan que los servicios sigan unos estándares acordados y que mitiguen los riesgos en los que se pueda incurrir. Debida a la escala y la extensiva responsabilidad del proveedor los contratos de llave en mano conllevan una separación dedicada de los riesgos compartidos y potenciales recompensas por un mejor desempeño.

El contrato por llave en mano representa una oportunidad idónea para países que se encuentren en vías de desarrollo y por tanto tengan interés en desarrollar su infraestructura desde cero y con altos estándares de rendimiento. Para facilitar el desarrollo sostenible de estas operaciones los servicios suelen estar vinculados con desarrolladores locales que permitan que la contratación de las órdenes de trabajo pueda recompensar a las comunidades locales.

El sexto tipo de contrato de mantenimiento estudiado es el contrato de mantenimiento multietapa. Los contratos de mantenimiento por etapas resultan idóneos para trabajos de mantenimiento o procesos que requieran de separación del trabajo en diferentes etapas. El proveedor será recompensado por la consecución de diferentes etapas de manera continua.

En estos contratos es importante determinar cuales son los criterios de avance entre las diferentes etapas a través de hitos, criterios y resultados establecidos. El contrato a su vez destaca por su flexibilidad ya que se puede determinar la evaluación de las etapas posteriores durante las fases previas. La mejora continua de las expectativas y de los procesos a realizar es por tanto promovida ya que se pueden realizar ajustes durante las diferentes etapas.

Estos tipos de contrato son idealmente delineados con una visión estratégica de las labores a completar. La compensación ideada por etapas para la consecución de los diferentes

objetivos además de la renovación opcional para los servicios en las etapas posteriores dentro del contrato permite que este tipo de contrato sea ideal para procesos que requieran de innovación operacional grande para la empresa contratante y que por tanto pueda beneficiarse de un procedimiento más flexible y adaptado a necesidades de las que no tiene perfecta información.

Por último, a los tipos de contrato anteriores debe añadirse la consideración de establecer los servicios mediante un coste variable añadida a la tarifa fija. Estos contratos resultan más flexibles ya que solo se negocia una prima de operación por los servicios dados y el reembolsado de los costes de operación.

Esta tipología para los contratos puede resultar en mejores eficiencias de los costes ya que los proveedores no cuentan con el mismo potencial incentivo que en otros contratos de controlar los costes y por tanto poder resultar en recortes de operaciones innecesarios. Por la misma razón la calidad y rapidez de los procesos esperados puede ser mayor ya que la operativa no se encuentra dictaminada por los costes esperados sino por la prima que se espera tras la consecución de las operaciones.

Sin embargo, aunque inflar los costes por parte del proveedor no es una consecuencia esperada por parte de este tipo de contrato si que puede requerir de un mayor nivel de revisión de las operaciones llevadas a cabo por el proveedor. Adicionalmente, evitar la consideración del control de costes puede llevar a metodologías más complacientes en la gestión de los recursos que acaben trayendo costes que podrían no ser los más competitivos. La principal desventaja bebe de la anterior y se visibiliza en el desconocimiento parcial de los costes finales para quien contrata estos servicios que puede encontrarse por encima de las expectativas iniciales.

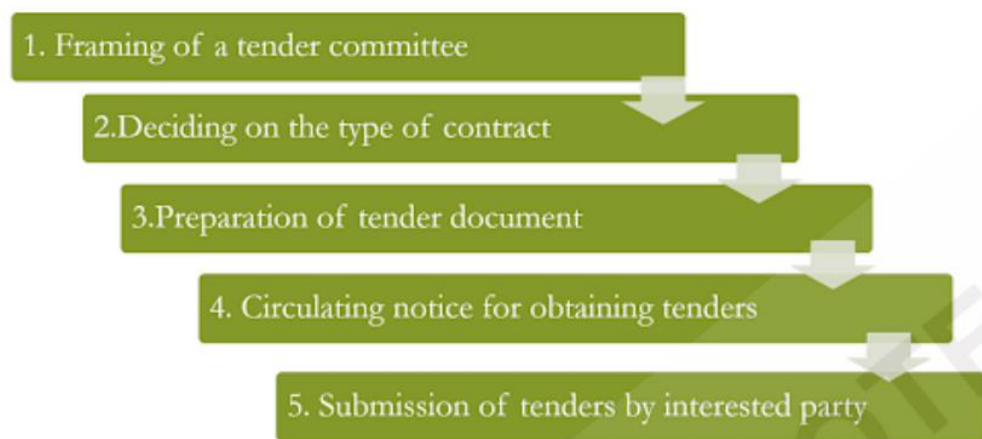


Figura 15: Proceso de subasta de los contratos de mantenimiento [IHM13]

El proceso de determinación de los contratos de mantenimiento debe considerarse como flexible, aunque puede seguir las siguientes fases dependiendo de la institución interesada en los servicios específicos.

En caso de que la escala del contrato sea mayor el contrato de mantenimiento puede requerir de la formación de un comité de expertos o la contratación de externos que puedan decidir la mejor manera de llevar a cabo el contrato de mantenimiento. Posteriormente la decisión del tipo de contrato de mantenimiento debe llevarse a cabo considerando los elementos descritos anteriormente durante el trabajo. La separación de las diferentes tareas, la especialización necesaria por parte del proveedor, la escala, los tiempos, las expectativas de costes y el conocimiento interno sobre los procesos de mantenimiento internos a llevar a cabo son algunas de las consideraciones más relevantes para que la selección sea adecuada.

Las fases posteriores no resultan únicas al proceso de contratación de mantenimiento ferroviario sino a todos los procesos de subasta por los que se prepara la documentación necesaria de cumplimentación por las partes interesadas. Tras las solicitudes pertinentes y las consideraciones de los diferentes proveedores se debe escoger aquel que se ajuste de mejor manera a las expectativas internas sobre el desenlace del proceso y los costes vinculados.

Tras la explicación de los tipos de contrato que se manejan en los sectores industriales y en el sector ferroviario para el mantenimiento de instalaciones se procede a fundamentar y facilitar la visibilidad de los contratos que se pueden esperar en el mantenimiento ferroviario con los siguientes ejemplos.

Alstom completó en junio de 2023 un contrato marco para 50 locomotoras Traxx Universal multisistema con un paquete de mantenimiento completo de 16 años. El pedido base es de 15 locomotoras y el mantenimiento de servicio completo firmado demuestra la similitud de este enfoque integrado en el material rodante [GRR23,2].

Los trenes Alpha adjudicaron a Siemens Mobility un contrato para cubrir el mantenimiento completo de las locomotoras Vectron (Alpha trains, como empresa de leasing, posee 80 locomotoras Siemens Vectron) durante 15 años, lo que también demuestra que el mantenimiento completo se adjudica independientemente de la integración a partir del contrato de adquisición de las locomotoras [GRR3,3].

La autoridad de transporte público de la región de París ha dado el contrato para la operación y mantenimiento de la línea 15 sur del “Grand Paris Express” a Alstom [ALSTOM23,1]. El contrato incluye el mantenimiento de la red de metro automatizada, los trenes y los centros de control. Adicionalmente se considera la extensión de los servicios de seis años a nueve años.

El autoridad de transporte y carreteras de Dubai (RTA) ha contratado también a Alstom los servicios de mantenimiento de su servicio de Tranvías por 13 años [ALSTOM23,2]. El servicio de tranvías de Dubai fue proviste originalmente también por Alstom y representa el primer servicio de su tipo completamente integrado y sin la necesidad de catenaria en oriente medio.

La española ILSA le dio en 2021 el contrato a 30 años vista para el mantenimiento de su flota de trenes por un coste de €737M [HITACHI21]. El contrato representa continuidad con la construcción de los trenes por Hitachi y por su presencia en el país.

En septiembre de 2021 Siemens Mobility firmó un acuerdo de \$3bn con las autoridades egipcias para la construcción y mantenimiento con un contrato de llave en mano por la provisión de trenes, vías y otra infraestructura para 660km de vía [SIEMENS21].





# Mantenimiento Predictivo e Industria 4.0

El mantenimiento predictivo corresponde a la sección de las técnicas del trabajo sobre el que existe más documentación. Esto se debe a que representa el siguiente límite sobre el que ya se han desarrollado productos viables, tiene impacto en el mercado, ve su aplicación natural en el mantenimiento por el comportamiento histórico de recopilación de datos de fallas previas y opera con componentes tecnológicos con razonable capacidad de medición y de previsión de roturas.

Con el objetivo de generar una mayor comprensión del proceso de mantenimiento predictivo a nivel tecnológico y de aplicación se procederá a la explicación de la capa de tecnología clave, los componentes sobre los que se aplica dentro del mantenimiento del tren, casos y estudios de aplicación y diferentes estadísticas que favorecen el caso para su uso y las inversiones que se están llevando a cabo en esta técnica de mejora de operación y costes en el mantenimiento.

La monitorización basada en la condición y el mantenimiento predictivo constan de una serie de capas de tecnología clave [RSM&DO23] que merecen un análisis dedicado y profundo por fases.

A la hora de analizar el mantenimiento predictivo la primera fase es la sensorización de los componentes relevantes para el mantenimiento. Esta sensorización se realiza a través de sensores "IoT" que desempeñan un papel fundamental en la transformación digital de la industria ferroviaria al proporcionar una recopilación continua de datos en tiempo real. Estos sensores cumplen el análisis de las funciones específicas del componente tales como medir la temperatura y la vibración para monitorizar el desgaste de los componentes. Su capacidad para capturar información detallada sobre el estado operativo de los trenes permite una vigilancia constante y una identificación temprana de posibles problemas.

La sensorización es la fase que merece mayor cuidado dentro del análisis global del mantenimiento predictivo, ya que de su adecuado desarrollo dependen todas las fases posteriores. Además, influye directamente en la calidad y confiabilidad de los datos recopilados. La selección cuidadosa de sensores, su ubicación estratégica en los

componentes críticos y la configuración precisa para capturar los parámetros relevantes son aspectos esenciales.

A continuación, se incluyen algunas recomendaciones sobre las que se pueden construir un modelo de sensorización más preciso. “La sensorización suele involucrar más del 80% de los costes derivados de los proyectos con machine learning” [RENESA23] por lo que su desempeño adecuado es vital para el éxito del mantenimiento predictivo.

**TRACTIAN**

		Selección de Análisis de Aceite por Aplicación								
Tipo de prueba/Procedimiento		Rodamientos en bombas y motores	Motores Diesel o gas	Sistemas hidráulicos	Compresores de gas y aire	Chillers y refrigeración	Cajas reductoras y diferenciales	Aceite para engranajes industriales	Turbinas de vapor	Turbinas de Gas
01	Número de partículas	R	R	R	R	R	R	R	R	R
02	Viscosidad a. 40 °C b. 100 °C	R N	N R	R N	R N	R N	R N	R N	R N	R N
03	Número ácido	E	N	R	R	R	R	R	R	R
04	Número base	N	R	N	N	N	N	N	N	N
05	FTIR a. Oxi/sulf/Nit b. Combustible	R N	R R	R N	R N	R N	R N	R N	R N	R N
06	Densidad ferrosa	E	R	R	R	R	R	R	E	E
07	Prueba de agua	E	E	E	E	E	E	E	E	N

FTIR = Espectrofotómetro de Transformada de Fourier  
R = Rutinario  
E = Prueba especial  
N = No aplica

Figura 16: Ejemplo de una matriz de cobertura sobre la que decidir las necesidades de sensorización [TRACTIAN23]

La realización de una matriz de cobertura de datos permite visibilizar, con el análisis de todas las combinaciones posibles de ejemplos, las condiciones a estudiar de cara a realizar los diferentes mantenimientos predictivos. Con una comprensión profunda de los procesos a realizar y los indicadores que lo dictaminan existe menos riesgo de cometer errores.

La realización de un plan de instrumentación (IP) por el que se definan todos los aspectos referentes a los aparatos requeridos y las comunicaciones por su tipo. Es un componente importante para estructurar el protocolo de mantenimiento predictivo ya que con ello se puede referir fácilmente a información obtenida y establecer la conexión con su componente real y problemas derivados de su recolección de datos de manera eficaz.

Por último, es recomendable la creación de un protocolo de recolección de datos. El protocolo sigue las fases del proceso que se deben seguir para llevar a cabo la recolección de datos. Se enforca en los pasos referentes a la calibración de dispositivos, el periodo de pruebas y como los resultados de los datos serán recolectados, almacenados y manipulados.

La siguiente parte necesaria del proceso tecnológico del mantenimiento predictivo se refiere al procesamiento y análisis de datos. El análisis de datos y el procesamiento de los datos son las fases que proceden a procesar los datos conseguidos exitosamente en la fase de recolección. Como se ha discutido anteriormente, es vital que se haya realizado una fase adecuada de monitorización para poder llevar a cabo el procesamiento y análisis de los datos.

Con el análisis de los datos se busca encontrar patrones, tendencias o irregularidades que puedan dar pistas sobre el estado operativo de los componentes. Utilizando herramientas estadísticas y técnicas de aprendizaje automático, se explora la información para obtener una visión completa de la salud y rendimiento de los activos. Esta información debe ser adaptada a los algoritmos específicos para adaptarlos a su formulación específica.

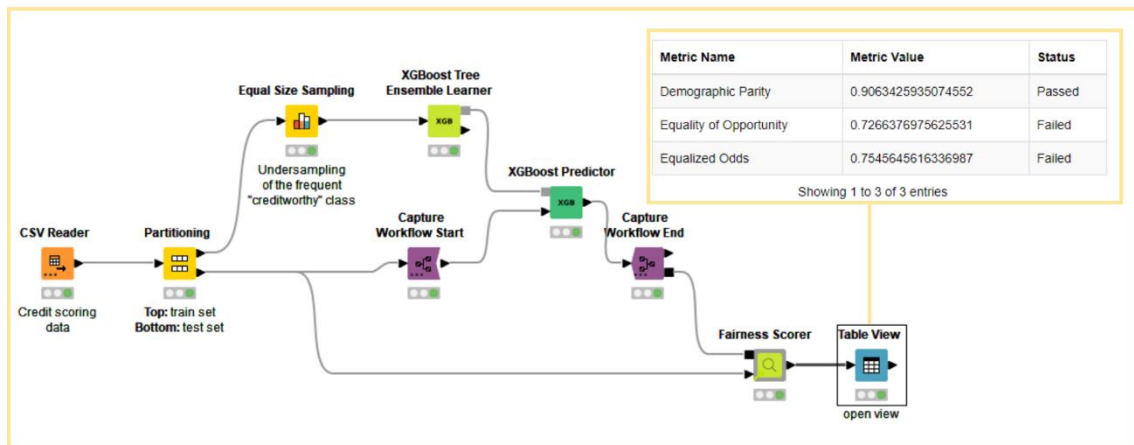


Figura 17: KNIME es una de las aplicaciones de gestión de datos masivos para

Luego de analizar los datos, se procede al procesamiento mediante algoritmos diseñados para interpretar la información recopilada y realizar predicciones. Estos algoritmos pueden incluir modelos de aprendizaje automático que asignan puntuaciones (scoring) a diferentes situaciones futuras. La aplicación de estas lógicas de predicción con scoring permite anticipar posibles fallos o necesidades de mantenimiento, facilitando la planificación proactiva de intervenciones y contribuyendo a la eficiencia operativa al

reducir el tiempo de inactividad no planificado. Además, la implementación de estas lógicas proporciona una base sólida para tomar decisiones informadas en el ámbito del mantenimiento ferroviario.

Durante el transcurso de los cursos universitarios se han realizado diferentes asignaturas enfocadas al análisis de datos a través de Anaconda en Python y también durante las prácticas realizadas en una empresa de defensa tecnológica se desarrollo conocimiento aplicado en una oportunidad real de Industria 4.0 con el programa de análisis de datos masivos KNIME.

El funcionamiento habitual de una aplicación de análisis de datos predictivo para identificar comportamientos en el mantenimiento pasa primero por la manipulación de los datos recibidos de los sensores para conformarse en un formato digerible por el programa, visiblemente entendible y eliminando errores de medida y ajustando formatos de datos incorrectamente importados tales como el formato numérico en categorías string.

Tras la fase de manipulación de los datos que entran estos datos se manipulan de cara a adaptarse a los algoritmos a utilizar. Algoritmos como bosques aleatorios, árbol de decisión, el perceptrón multicapa, Naïve-Bayes y las redes neuronales que incluye la biblioteca de Python de KNIME son esenciales para el mantenimiento predictivo ya que permiten el predecir de manera masiva con grandes cantidades de variables, pero clasificando los resultados de manera binaria.

La parte de la predicción con el algoritmo requiere de una selección adecuada de una población de los datos de entrenamiento mientras que el resto de los datos se aplican para corroborar la lógica del algoritmo entrenado y comprobar su capacidad de acertar que componentes deberían ser cambiados mediante mantenimiento predictivo. En algunos casos que se describirán más adelante se pueden conseguir porcentajes de éxito muy altos, aunque no todos los componentes tienen una relación tan directa con los parámetros de medición que permitan predecir su rotura en cualquier caso que se presenten ciertas variables en la medición.

Por último, las aplicaciones de análisis de datos y la programación basada en Python permiten una biblioteca amplia de opciones de visualización y representación de los datos y de las conclusiones del análisis. Además, las bibliotecas también permiten la interconectividad con otras aplicaciones de soporte que pueden ayudar a la visualización de flujos de información, resultados y a enriquecer las decisiones a tomar para mejorar el desempeño de los componentes específicos bajo estudio.

A nivel de resumen la aplicación del mantenimiento predictivo resulta de gran interés para muchos de los componentes de los trenes, pero para facilitar la comprensión de los componentes específicos que se pueden beneficiar de gran manera por una monitorización y predicción de rotura adecuada se ha elaborado la siguiente lista de componentes clave:

- Ruedas, ejes y suspensión
- Motor y sistemas de potencia
- Acoplador y conexiones
- HVAC
- Sistemas de puertas
- Sistemas de iluminación
- Comunicación a bordo
- Sistemas de frenado
- Eléctrico
- Amenidades para pasajeros

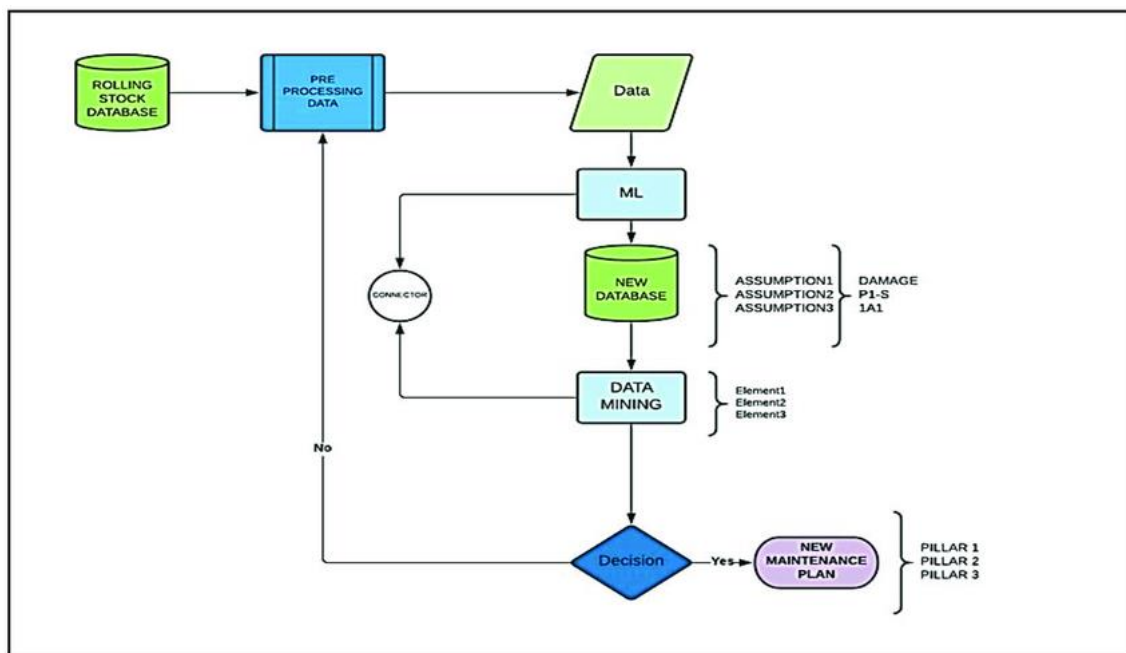


Figura 18: Diagrama de flujo para el nuevo plan de mantenimiento predictivo

A continuación, se procede a la ejemplificación de la aplicación de estos métodos de mantenimiento predictivo aplicados a los diferentes planteos y estudios realizados de manera reciente.

El 21 de enero de 2021, un estudio sobre el mantenimiento predictivo mediante minería de datos de aprendizaje automático para los ferrocarriles griegos muestra el proceso habitual de entrenamiento de predicción de aprendizaje automático. A través de la iteración en la base de datos de fallas preexistente, se pueden decidir nuevos planes de mantenimiento. Esto, sin embargo, está limitado por la riqueza y la integridad de los datos de reparación de operaciones anteriores. Las tasas de éxito de la predicción se sitúan entre el 80 y el 90 por ciento [MP21].

El 15 de julio de 2023, un estudio sobre el mantenimiento predictivo utilizando algoritmos de aprendizaje profundo de memoria a corto plazo a largo plazo es capaz de realizar un mantenimiento predictivo de equipos de almacenamiento ferroviario centrado en el sistema de refrigeración del convertidor de tractor de tren con una precisión de pronóstico superior al 99% y una tasa de falsas alarmas de ~0,4% [SIMONE23].

Kistler publicó un caso de éxito en el que mejoraron las prácticas preexistentes de mantenimiento predictivo de la industria 4.0. Llevaron a cabo un replanteamiento completo de los procesos que se habían vuelto menos eficientes y desarrollaron una nueva solución de medición de la fuerza de frenado. Un sistema compacto de adquisición de datos KiDAQ y una aplicación de portátil que cabe en una carcasa rígida resistente. Esto les permitió mejorar su recopilación de datos para los algoritmos predictivos de la industria 4.0.

El replanteamiento de todo el proceso también les hizo darse cuenta de la necesidad de adaptar una de las presiones en las mediciones de rotura, ya que el acoplamiento neumático rápido significaba que se necesitaban dos pasos para una buena medición del proceso dentro del vagón. [KISTLER21]

En esta mejora de las prácticas anteriores, también se centraron en la solución de software individual. En cuanto al mapeo del proceso de servicio para cumplir con los requisitos de trazabilidad, se desarrolló una aplicación dedicada. Al combinar el software individual con el hardware modular, la fase inicial de implementación reportó mejoras de eficiencia que rastrearán diariamente durante un período más largo de operación. [KRISTLER21]

**NEXALA R2M** Fleet Summary Unit Summary Fleet Location Event History Event Analysis Downloads Performance

ICR 290 201 MK4

Headcode	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Last Update Time	Location	Speed (kph)	Leading Vehicle	Live Faults	Live Warnings	Cab	General Warning	Teloc	BECU	Power Pack	ZF Transmission	Stage V	Battery Charger	HVAC	Doors	PA/PS	Engine Hours	AVG % Full
A700	22041				27/04/2023 15:11:17	HSTON	0.0	22241	0	2													0
A807	22042				27/04/2023 15:11:23	ATLNE	88.7	22342	0	1													60
C208	22043				27/04/2023 15:11:16	CNINLY	20.9	22243	0	4													5
D814	22044				27/04/2023 15:11:21	CNINLY	0.0	22244	1	3													23
A804	22045				27/04/2023 15:11:20	BYHNS	107.0	22245	0	6													75
	22046				27/04/2023 15:11:22	HSTON	0.0		0	1													0
I347	22047				27/04/2023 15:11:21	HSTON	15.0	22347	0	0													3
A506	22048				27/04/2023 15:11:18	THTWN	0.0	22248	0	0													30
A713	22049	22056			27/04/2023 15:11:25	PTRTN	66.5	22356	0	3													48
D215	22050				27/04/2023 15:11:24	SALNS	0.0	22250	0	1													27
C203	22051				27/04/2023 15:11:25	HSTON	0.0	22251	0	1													20
A706	22052	22018			27/04/2023 15:11:24	BSLOE	62.5	22252	0	7													51
P412	22053				27/04/2023 15:11:15	NBRGE	0.0	22353	0	0													13
J202	22054				26/04/2023 14:34:00	ICGREW	0.0	OFF	0	0													7
A606	22057				27/04/2023 15:11:25	ARKLW	95.3	22257	2	3													63
A436	22058				27/04/2023 15:11:17	LMRCK	0.0		0	1													40
	22060				27/04/2023 14:50:07	CNINLY	0.0	OFF	0	0													0
J234	22061				27/04/2023 15:11:26	LTCOTS	0.0		1	0													13
D214	22062				27/04/2023 15:11:24	MONVN	122.2	22362	0	0													38
	22063				27/04/2023 15:11:25	LTCOTS	0.0		0	2													25

Figura 19: Sistema Nexala R2M desarrollado por Trimble

La flota mayoritariamente diésel de Irish Rail (el operador nacional irlandés) está actualizando sus sistemas para proporcionar una mayor capacidad y disponibilidad. Para ello, el país va a actualizar su actual sistema Nexala R2M a R3M, en el que podrá realizar diagnósticos predictivos. Además, la flota se ha adaptado para ser utilizada para la localización de la flota, la inspección, la búsqueda de fallas, la planificación del mantenimiento, el kilometraje y el seguimiento de las horas del motor [GRR23,5]





# Mejoras Logísticas

Las mejora logística en la red es una categoría agrupadora que trata de referirse a los métodos en la literatura científica para reducir la congestión y mejorar la disponibilidad de los activos ferroviarios para realizar servicios y aumentar el retorno económico de las operaciones ferroviarias.

La congestión de la red ferroviaria es uno de los problemas que afecta negativamente a la red. La incapacidad de la red para gestionar la acumulación de trenes, así como la saturación de la infraestructura en puntos específicos aumenta los tiempos de espera, reduce los flujos posibles de carga y personas a transportar y condiciona pérdidas dentro del sistema.

The screenshot shows the National Rail website interface. At the top, there are navigation tabs: 'National Rail', 'Live Trains', 'Status and Disruptions' (which is selected), and 'Plan a Journey'. Below the navigation, the main heading is 'Disruptions and timetable changes'. A list of six items follows, each with a warning icon and a right-pointing arrow:

- Major disruption to Thameslink services on Saturday 30 and Sunday 31 December - no overnight service on New Years Eve
- Travel advice during the Christmas and New Year period
- Disruption between Newcastle and Berwick-upon-Tweed expected until the end of the day
- Disruption between Ebbsfleet International and London St Pancras International expected until the end of the day
- Residual disruption caused by Storm Gerrit is affecting some services in Scotland until the end of the day
- Buses replace trains to / from Barton-on-Humber until the end of the day

To the right of this list is a photograph of a busy train station platform with people waiting. Below the photo is a yellow arrow pointing right, followed by the text: 'How to claim compensation if your journey is cancelled or delayed'. Below this is a sub-heading: 'Find information on train delay compensation, including Delay Repay, and how to claim.'

Figura 20: Resumen de las interrupciones y congestiones en la red inglesa

De cara a proveer a los usuarios con resúmenes de los impactos que ocurren en directo en la red todas las compañías nacionales cuentan con resúmenes de las incidencias que se han dado por factores climáticos previsibles u otros eventos distorsionadores de la disponibilidad de los ferrocarriles [INTERRAIL23].

Además, incrementos imprevistos en la demanda, falta de coordinación entre los diferentes actores del sistema ferroviario y una saturación de la capacidad máxima que tienen previstas las redes de transporte son algunos de los factores exógenos al mantenimiento que pueden afectar a la congestión.

Al aplicar esta problemática enfocada al mantenimiento de trenes se puede ver como el mantenimiento puede convertirse en un foco de congestión por varias razones. La primera, de estudio relevante a la hora de medir los indicadores principales de rendimiento, es la congestión ocasionada por las incidencias de fallas de carácter correctivo.

Estas fallas de carácter correctivo aumentan en frecuencia y escala por el efecto de un mantenimiento inadecuado. Los tiempos de inactividad generados por las fallas generan retrasos en las rutas e interrumpen operaciones de envíos ya programadas.

En este aspecto la problemática de ocurrencia de fallas imprevistas se gestiona a través de las técnicas estudiadas en los otros apartados que se enfocan en realizar una mejor monitorización de los indicadores que sirven para adelantar la incidencia de fallas imprevistas. El mantenimiento predictivo, mejoras en los procesos de entrenamiento y mejoras de los equipamientos con los que se llevan a cabo los procesos pueden mejorar los indicadores de eficacia del mantenimiento y reducir la incidencia de fallas imprevistas.

Para reducir la congestión en la red desde el lado logísticos se debe hacer un enfoque no en la previsión de las fallas sino en la solución de los problemas que se originan a través de la ocurrencia de estas fallas.

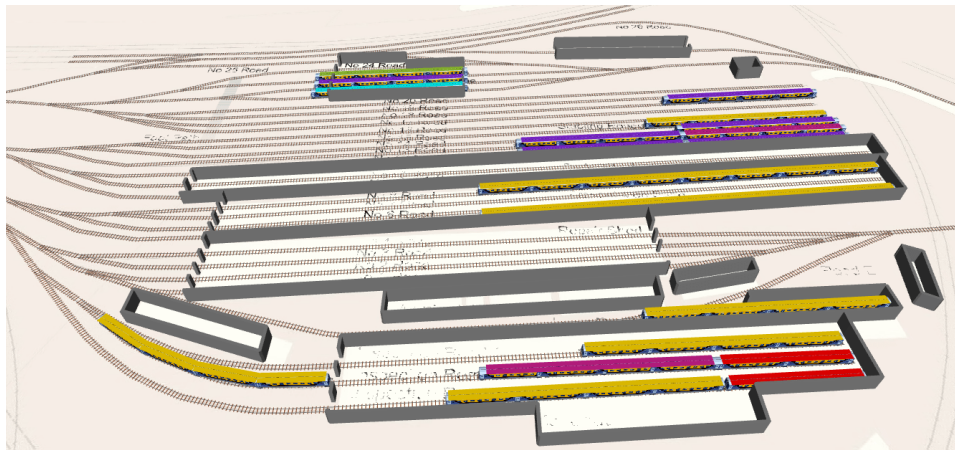


Figura 21: Simulación del funcionamiento de un taller de mantenimiento en Australia  
[ANYLOGIC23,1]

Adicionalmente otra manera en la que prevenir con la logística la ocurrencia de congestiones es la reducción de los fenómenos de sobrecarga en los talleres de mantenimiento que llevan al incremento de la congestión dentro del propio taller, disminuyendo su eficiencia y por tanto afectando a la red en general.

Un ejemplo de este proceso de mejora logística con modelos, pero sin llegar al uso de gemelos digitales, de aplicación en otro apartado, es el proyecto de mejora propuesto por Evans & Peck a Aurizon. Aurizon es una compañía con más de 700 locomotoras y 16,000 vagones que la convierte en la mayor exportadora del mundo de carbón entre las minas y las instalaciones portuarias.

El proceso de mejora de las consideraciones logísticas del taller parte primero por un estudio de la capacidad del taller para llevar a cabo procesos de mantenimiento y crear un modelo que pueda realizar las simulaciones de ocurrencias necesarias tanto para el caso específico como para su extrapolación a una red más grande.

La simulación tenía en cuenta consideraciones entre las que se incluye la preparación de las locomotoras, su mantenimiento y el de los vagones, las examinaciones realizadas para comprobar la fiabilidad de los equipos, la estiba de los vagones y locomotoras y las limitaciones del tráfico ocasionadas en la salida del taller a estudiar.

El modelo a su vez se centraba en monitorización de parámetros como las configuraciones de los trenes, su movimiento dentro del taller, la utilización de los diferentes railes dentro del taller, la utilización de las instalaciones del taller de mantenimiento, los tiempos de

estiba, la organización de los tiempos en los que se deben realizar las diferentes tareas y su impacto en los servicios principales del taller de mantenimiento.

Tras la consideración de estos factores y su modelización se consiguió crear eficiencia en el uso del taller y reducción de las congestiones internas mediante el incremento de las vías internas que experimentan mayor utilización, la mejor distribución de las operaciones de mantenimiento entre los talleres circundantes para aumentar la eficiencia en resolución de los problemas y la mejor coordinación de los procesos dentro del propio taller para poder maximizar la utilización. Los cambios en las operaciones relevantes del taller se analizan para poder reajustar el plan maestro con los calendarios de las rutas contratadas para la red australiana relevante.

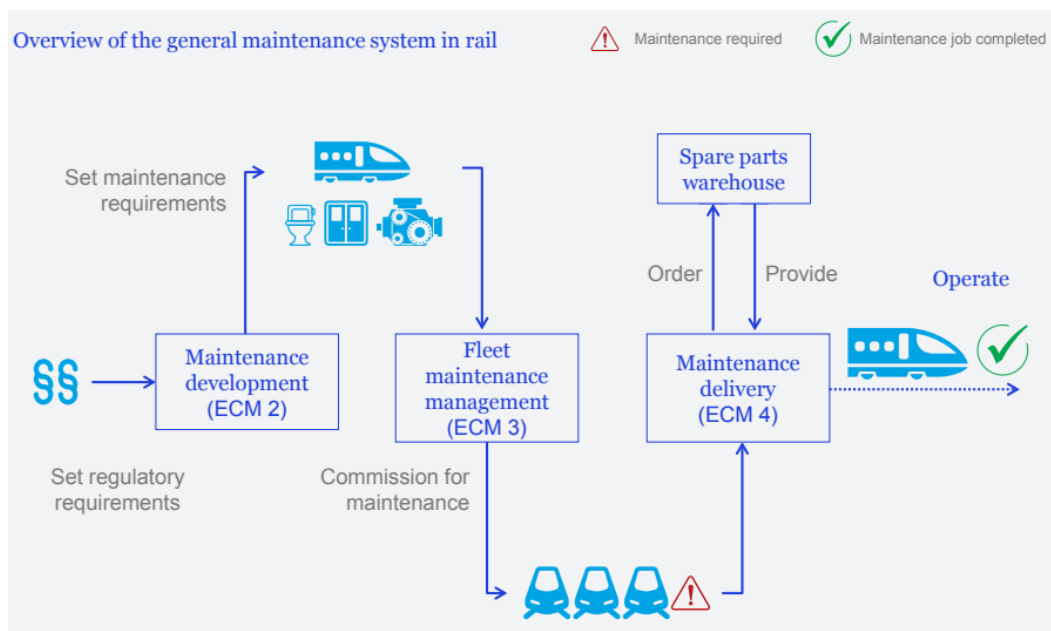


Figura 22: Proceso de identificación de necesidades de mantenimiento [MCKINSEY17]

Otra consideración es la destacada en el manual de mantenimiento de McKinsey en torno a los cambios en la configuración de los procesos de mantenimiento y la coordinación a través del análisis de datos y la planificación simultánea de los procesos a llevar a cabo.

En la actualidad los procesos de mantenimiento dentro de la red ferroviaria reciben una consideración de desconexión inherente entre las geografías en las que se han diseñado los trenes y las operaciones de mantenimiento del proveedor con las regulaciones necesarias en el país de destino. Este proceso de adaptación y de determinación de los requisitos necesarios para el mantenimiento se sigue de las funciones del operador de los trenes y su uso habitual.

En los casos de necesidades de mantenimiento esta cadena se prolonga al actor encargado de realizar las tareas de mantenimiento el cual debe llevar a cabo por separado y, en caso de mantenimientos correctivos, de manera imprevista los trabajos de aprovisionamiento necesarios. Esta desconexión de los actores y las funciones se convierte en una problemática a nivel logístico ya que impide una consecución fluida de las tareas de mantenimiento.

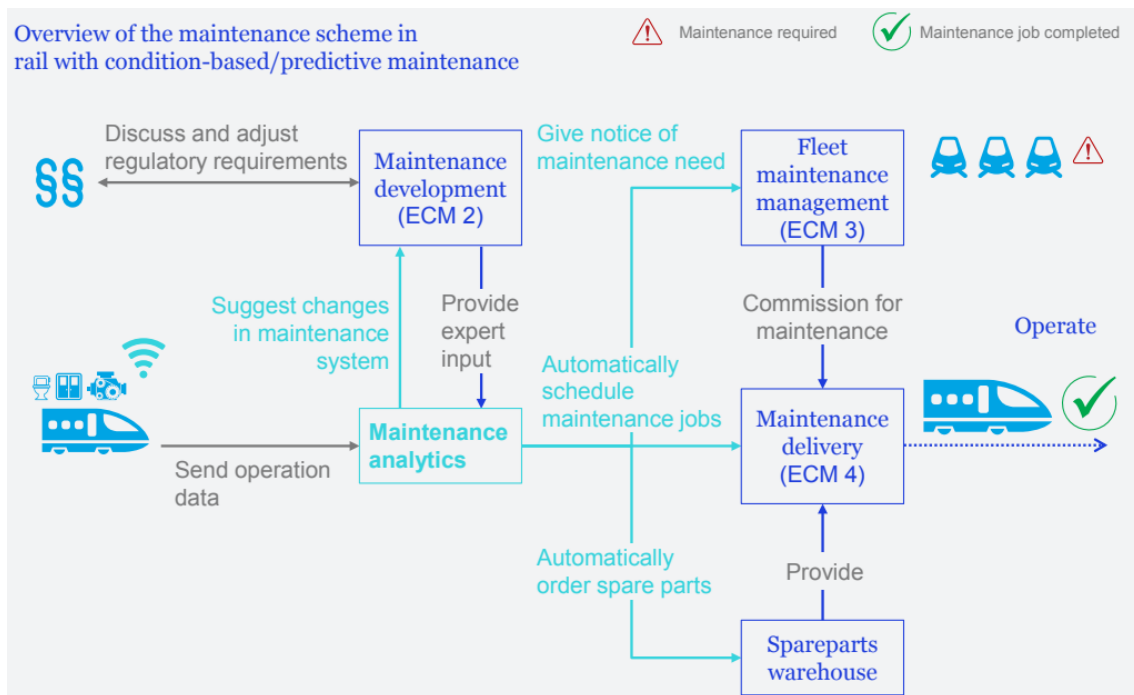


Figura 23: Cambio de los roles fundamentales de mantenimiento [MCKINSEY17]

Con la introducción del análisis de datos avanzado y la mejora considerable de la transmisión de información entre los diferentes actores la operativa de mantenimiento se convierte en una operativa no limitada de manera lineal, sino que puede operar en paralelo.

La dinámica regulatoria entre los países de origen y destino de las soluciones ferroviarias se mantienen constantes, pero en análisis y la monitorización de los parámetros de mantenimiento permite una relación mucho más fluida entre los activos y las compañías encargadas de la puesta en marcha de estos activos.

El flujo de información por tanto se modifica de la puesta en marcha de los parámetros de mantenimiento a una relación bilateral entre la opinión de experto y la información dinámica de los equipos en condiciones de funcionamiento real y con datos masivos de fallas previas.

Con este proceso de análisis la dinámica para los operadores de los trenes y los actores encargados del mantenimiento se altera considerablemente. Al existir esa armonización de la transmisión de información y existir una visión informada de las potenciales roturas por ocurrir la configuración logística se simplifica por poder anticipar rotura correctivas o planificar mantenimientos con antelación.

El operador es avisado anticipadamente de la necesidad de paradas de los activos por mantenimiento a la vez de que se automatiza el envío de calendarios de operaciones de mantenimiento a los actores pertinentes. Además, el aprovisionamiento de las piezas se puede realizar con antelación lo que permite una gestión dinámica y eficiente de los inventarios mínimos necesarios, producción esperada para los diferentes componentes y requisitos adicionales que se ajusten a las necesidades del mantenimiento.

Por último, es necesario comentar la utilización de las reparaciones en marcha y la instalación de talleres auxiliares en zonas con congestión de tareas de mantenimiento.

Las reparaciones en marcha normalmente se refieren a operaciones de mantenimiento realizadas por sobre los trenes en vías las cuales no son propietarias del propio tren. Estas reparaciones suelen ser de carácter menor por lo que no requieren la retirada completa de operación del tren.

Alertas ocasionadas por los detectores de caja caliente, rodamientos acústicos o carga de impactos en las ruedas se convierten en señales principales de la necesidad de realizar una reparación en marcha mediante la sustitución de parte de las ruedas del tren en operación [HUM21]. Otras reparaciones menores pueden incluir la sustitución de bombillas de faro o funcionamientos mejorables en los sistemas de calefacción y enfriamiento.

La capacidad de llevar a cabo estas reparaciones en marcha es vital de cara a poder descongestionar los talleres principales de reparaciones de mayor necesidad además de permitir que trenes que se encuentran con fallas menores puedan retornar a operación con la mayor antelación y reducir los sobrecostes generados por su parada.

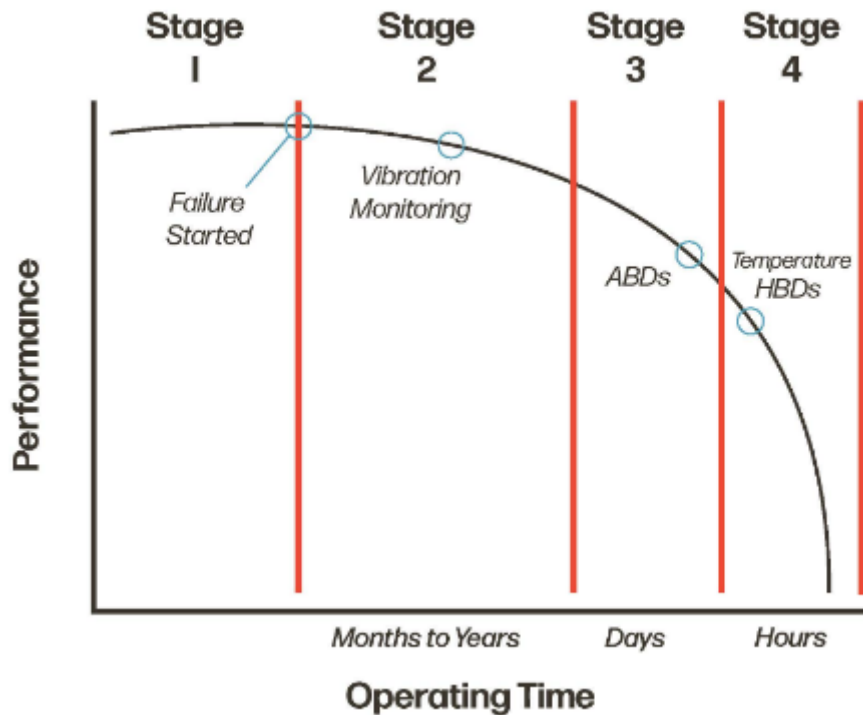


Figura 24: Ventana de oportunidad para los escenarios de fallo mecánico [HUM21]

A nivel de ejemplificación de la relevancia de las reparaciones en marcha se puede hacer el análisis de las fallas mecánicas de los ejes de los trenes. La operación habitual por su naturaleza no permite la detección del fallo con la mayoría de los sistemas de detección ni por el empeoramiento de las condiciones de operación hasta que la ventana de oportunidad de cambio del componente es muy limitada y por tanto se agrandan las posibilidades de una falla y se empeora la congestión del sistema por la urgencia.

Considerar las reparaciones en marcha como un bien auxiliar a contratar como parte de los contratos de mantenimiento es una necesidad de cara a aumentar la flexibilidad de uso de estos servicios que normalmente son independientes. Mediante el envío de señales al mercado de la necesidad de flexibilización de los sistemas a la vez que la mejora de los sistemas de monitorización se puede permitir una mejora en el manejo logístico de las congestiones en el mantenimiento.

Por ejemplificar la instalación de reparación de material rodante del 27 de abril de 2023 en el sitio de trabajo de Koper en Eslovenia muestra el enfoque en los talleres para realizar reparaciones con el fin de reducir las congestiones en la red de todas las reparaciones de material rodante que se desvían al taller de Divaca [RN23].





# Automatización

En el siguiente apartado se trata de englobar las técnicas en desarrollo y aplicación para la automatización de los procesos de mantenimiento ferroviario. El alcance de esta automatización se enfoca principalmente en la robotización y la digitalización por lo que se llevarán a cabo pequeñas explicaciones en torno a estas características.

Para contextualizar las áreas de aplicación, en preparación de la conferencia para el mantenimiento de trenes y depósitos de mantenimiento ferroviario de Europa en 2024 se ha realizado un estudio sobre las áreas principales de impacto para la automatización de procesos. Estas áreas de mejora en automatización para la reducción de costes y mejora de la eficiencia y seguridad identificadas son [RSM&DO23]:

- Inspección técnica de vehículos
- Análisis Diagnóstico
- Software de programación de mantenimiento
- Gestión de órdenes de trabajo
- Gestión de inventarios
- Documentación e informes
- Control de calidad
- Salud y seguridad
- Seguimiento de activos
- Limpieza y lavado de equipos

En estos campos se han desarrollado en todo el mundo soluciones de digitalización y robotización algunas de las cuáles se expondrán de manera breve a continuación y se considerarán como potenciales soluciones para la planta sobre la que se aplican las soluciones.

La automatización en el contexto de la robotización se refiere fundamentalmente a la aplicación de robots para realizar tareas relacionadas con las áreas anteriormente descritas. El enfoque que se transpira de estas soluciones es el de aumentar la eficiencia y utilización de los diferentes procesos de la planta, aumentar la seguridad respecto a los procesos en uso y aumentar la calidad de vida de los trabajadores mediante la reducción de procesos repetitivos y permitir la especialización de los trabajadores dedicados.

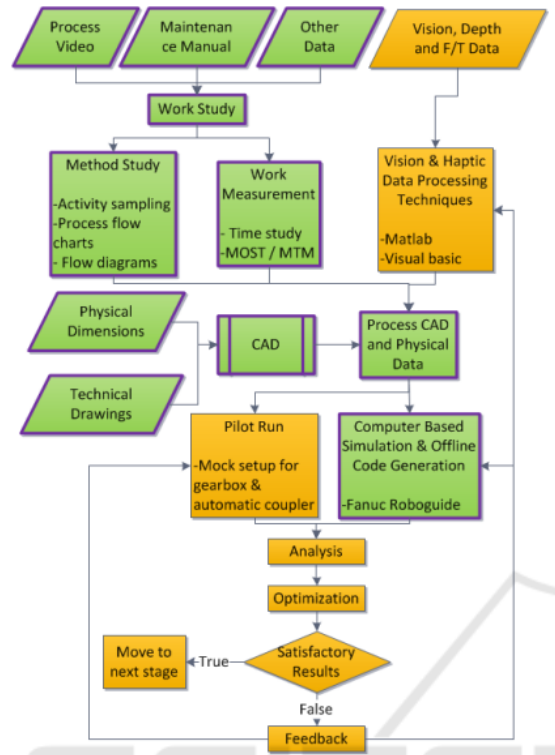


Figura 25: Esquema de trabajo fundamental para un proyecto de robotización [VITHANAGE17]

El esquema habitual de trabajo de robotización indica la necesidad de hacer el análisis de las soluciones ajustándose al proceso específico que se esté automatizando. Una revisión adecuada de los procesos que se llevan a cabo mediante evidencia en vídeo, manuales de mantenimiento en uso y otros datos es necesario para dimensionar el alcance del trabajo a realizar además de determinar los modelos de robotización pertinentes.

Un procesamiento de datos adecuado, así como iteración en el desarrollo de proyectos piloto da la seguridad en los procesos propuestos y permite una adaptación adecuada al proceso a automatizar.

De manera genérica y para visibilizar mejor los tipos de robots que se encuentran en desarrollo para poder automatizar las tareas anteriormente descritas se encuentran los siguientes. Robots inspectores se encargan de las tareas de inspección autónoma mediante su desarrollo integrando sensores avanzados y tecnología de visión artificial que les permita identificar los patrones de desgaste y defectos. La revisión mediante el uso de robots es de gran interés ya que minimiza la necesidad de presencia humana en áreas de trabajo en las que la maquinaria por un funcionamiento accidental puede provocar accidentes laborales. Adicionalmente la estandarización mediante la robotización del

proceso de inspección facilita las labores de mantenimiento predictivo al crear constancia en la información sobre la que se analizan los datos lo que simplifica la parte algorítmica del mantenimiento predictivo.

Tareas de inspección habituales incluyen el reconocimiento de imágenes, el escaneo de las formas de superficies, ultrasonidos, la identificación de piezas rotas, pernos de control del par, inspección de ejes, extracción de la tapa de la caja de grasa del cojinete y muestro de aceite.

Para las tareas repetitivas y específicas como el pintado, la soldadura de algunos componentes, ciertas reparaciones y cambio de algunos componentes existen también robots de reparación. El uso de estos robots suele seguir consideraciones de reducción de costes económicos, mejora de los tiempos del proceso de utilización y la calidad del resultado final. Su aplicación se encuentra en procesos simples de automatizar y por tanto es idóneo para operaciones de mantenimiento programadas o para reparaciones estandarizadas.

Tareas que se incluyen en estos procesos de automatizado se incluyen la limpieza, abastecimiento de combustible, lijado, apriete, cambios de filtros y entrega de piezas y herramientas a los lugares de trabajo.

Para tareas que requieran mayor complejidad de operación mecánica se hace uso de brazos robóticos. Los brazos robóticos permiten la ejecución de diversas tareas de apoyo dentro de los talleres de mantenimiento o incluso operaciones preprogramadas completamente automáticas. La inclusión de brazos robóticos al igual que otros procesos de automatización por robotización permite que la operativa sea más económica, eficiente y mejora las condiciones de trabajo.

A continuación, se van a describir ejemplos reales de aplicaciones de robotización para poder presentar las iniciativas que se están llevando a cabo. La robotización de los procesos de mantenimiento es una práctica con gran cantidad de literatura y en la que el diseño específico que facilite un proceso es la prioridad.

La Universidad de Huddersfield lanzó un laboratorio de investigación robótica de vanguardia como parte de un proyecto de investigación de GBP 1.8M para mejorar la eficiencia en la operación en el sector ferroviario en dificultades a través del mantenimiento inteligente del material rodante. Las aplicaciones de la robotización en el mantenimiento del material rodante se extienden a [HUDDERSFIELD21].

La robotización del mantenimiento en su investigación también incluye bancos de pruebas de robots colaborativos que utilizan brazos robóticos colaborativos más pequeños que pueden trabajar en el mismo espacio que un humano. Además, estos robots se pueden montar en cualquier bastidor para cualquier tarea de mantenimiento en cargas útiles ligeras (menos de 12 kg). Para la simulación de estos espacios se utiliza la herramienta de simulación off-line "Octopuz" [HUDDERSFIELD21].

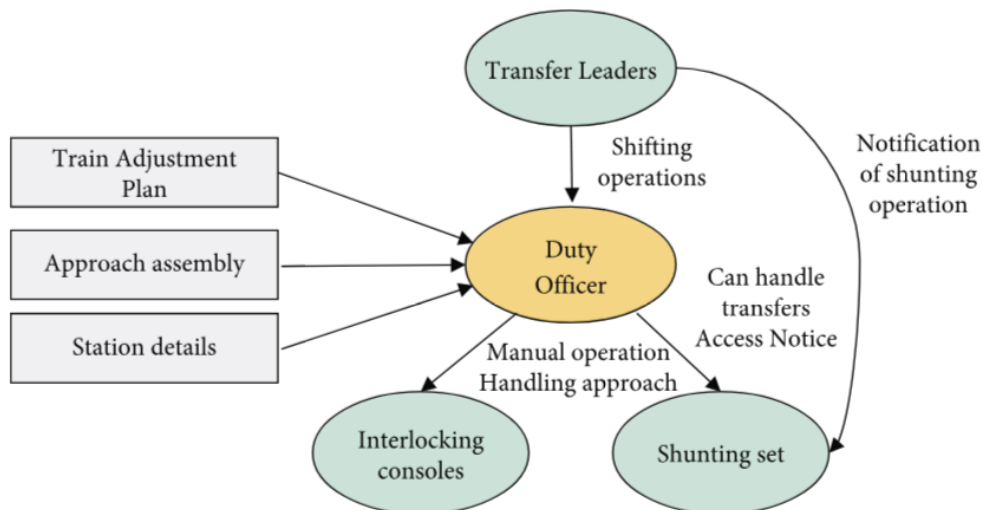


Figura 26: Esquema de trabajo fundamental para el ordenamiento de vagones tras operaciones de mantenimiento [TAO22]

El ordenamiento de los vagones es una de las tareas principales en la consideración de labores de mantenimiento por su impacto en el enlazado de los vagones tras operaciones de mantenimiento. En este aspecto un estudio de 2022 construyó un sistema inteligente con el que poder realizar un plan de automatización en la preparación de los planes de enganchado de los vagones de manera que se reduzcan el número de operaciones y se pueda mejorar el proceso [TAO22].

Northern en el Reino Unido anunció en julio de 2023 que está desarrollando una aplicación para comprobar cuándo se limpiaron por última vez los trenes. Esto, a su vez, beneficia las mejores prácticas y simplifica el mantenimiento en el sentido de la limpieza de los vagones. La empresa opera 345 trenes, lo que pone de manifiesto la cantidad de datos a tener en cuenta [GRR23,4]

Mecalux ha desarrollado un caso de estudio para la robotización de los talleres de mantenimiento de Renfe. La propuesta incluye grúas robotizadas que permiten el transporte de pequeños componentes y su circulación por áreas relevantes de la planta. El paletizado de todos los componentes a transportar permite a su vez el monitorizado

automático de estos y la revisión de su estado en curso cuando se encuentran en transporte por carretillas [MECALUX]

La Comunidad de Madrid anunció en marzo de 2023 la inauguración de una nuevo centro logístico para el mantenimiento de trenes de Metro de Madrid. El taller se ha localizado cerca de los talleres centrales de Canillejas y cuenta con robots avanzados para la organización de todas las piezas necesarias para el mantenimiento de los vagones y trenes además de su rastreo eficiente dentro de la planta. El presupuesto para el proyecto es de \$7.4M, aunque se estiman ahorros de \$14.6M durante los siguientes 15 años [CMADRID23].

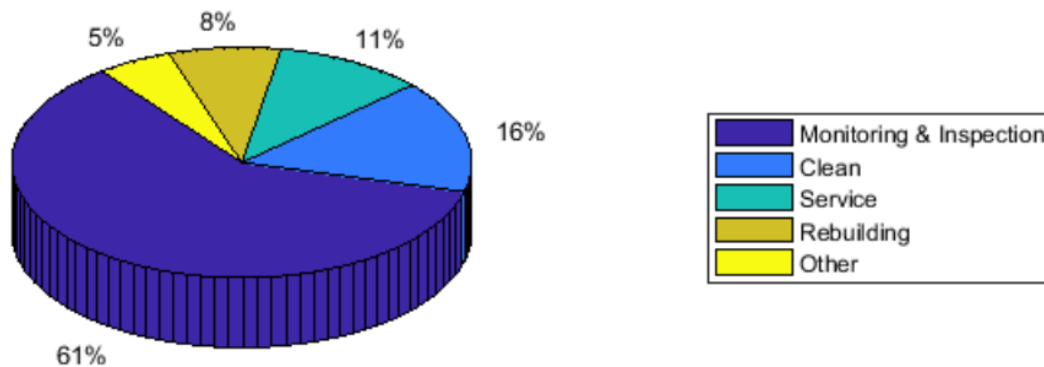


Figura 27: Distribución de tareas de sistemas robóticos autónomos UK [VITHANAGE19]

Según un estudio de la Glasgow Caledonian University, la aplicación de robots en labores físicas se reduce al 36,8% de las tareas totales. Estas tareas físicas resultan de mayor complejidad por su dificultad mecánica, aunque se destacan avances en los robots de limpieza tales como los conseguidos por parte de Toshiba [VITHANAGE19].

Adicionalmente a las tareas de automatización que se pueden conseguir mediante la robotización se deben considerar también las tareas de digitalización que permiten una mayor eficiencia dentro de las plantas. La digitalización es un componente esencial a su vez para permitir la robotización ya que la implementación de plataformas centralizadas con las que supervisar y coordinar las actividades de mantenimiento de forma automatizada es necesario.

El proceso de digitalización sigue en cierta medida las medidas de despliegue del mantenimiento predictivo ya que en mayor medida se encuentran integradas.

Adicionalmente a la digitalización de los datos se consideran también tareas de digitalización el desarrollo de plataformas integradas que permitan la interoperabilidad entre sistemas de manera que se simplifique la integración de procesos. La gestión de los inventarios mediante herramientas digitales se convierte en un precursor para poder llevar a cabo una robotización adecuada mientras que la centralización de los sistemas de control en el mantenimiento de manera digital permite decisiones más informadas.

Adicionalmente a las consideraciones técnicas deben llevarse a cabo programas de formación adecuados para la fácil implementación de las herramientas de uso digital. La formación en el uso de los dispositivos móviles y de monitorización de los activos, así como su rol dentro de la operativa de la planta y una clara delineación de los procesos que se mejoran con su uso es clave para que el proceso de implantación sea lo más fácil posible.

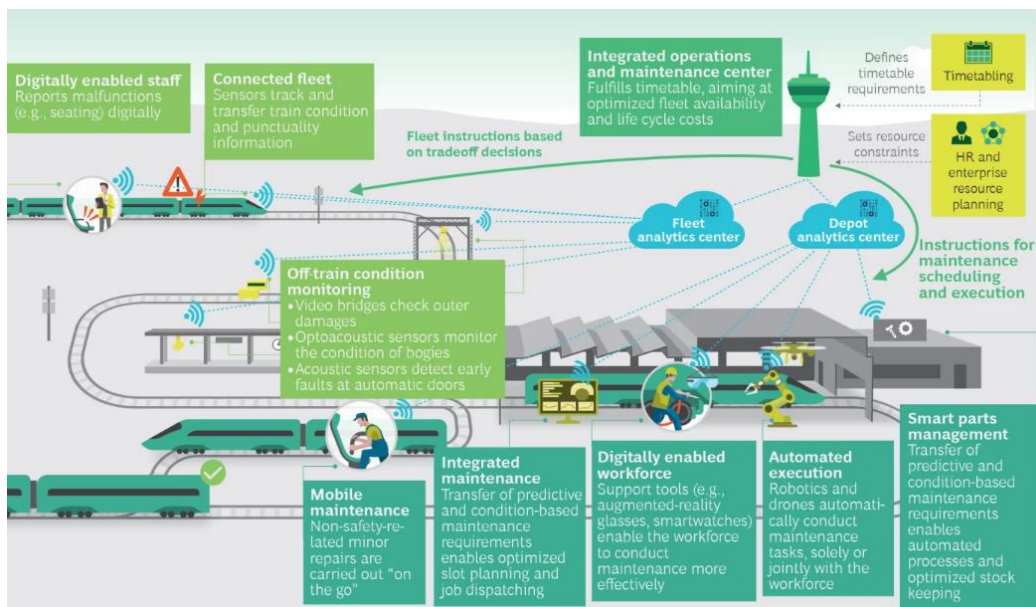


Figura 28: Potencial esquema de mantenimiento digital según BCG [ULRICH20]

El proceso de revisión para digitalización de las diferentes plantas con trenes GATX se realiza en más del 75% de las plantas. El plan que establecido para extenderse a sus 46 talleres de mantenimiento ya ha manejado 2,700 reparaciones de manera digital con más de un millón de medidas y 160,000 validaciones de los datos medidos [INDU21].

Para BLS Cargo (operador de carga líder en Suiza) la digitalización del negocio es importante para la operación. Proporcionan dos casos de uso de la digitalización.

La primera es la combinación de su sistema preexistente basado en SAP con el recién introducido Railnova para convertirse en el núcleo de su sistema de mantenimiento y comunicación. SAP actúa como maestro de todos los datos, mientras que Railnova proporciona la interfaz y la comunicación entre todas las partes interesadas. Para el uso de la información de un taxista, se coloca un código QR en la cabina que permite un acceso sin problemas a la información relevante, manual y mantenimiento e historial de fallas del tren.

Un caso diferente explica las limitaciones y las dificultades por las que atraviesan los esfuerzos actuales de digitalización. La aplicación de la Gestión Europea del Tráfico Ferroviario como norma europea en materia de seguridad ferroviaria solo ha supuesto beneficios marginales, ya que las especificaciones y los requisitos superan la capacidad de los proveedores para ponerse al día, lo que aumenta los costes y hace que los beneficios del esfuerzo global sean marginales [GRR23,6].





# Gemelos Digitales y Realidad Virtual

Dentro de las aplicaciones de tecnologías innovadoras al mantenimiento ferroviario, al igual que en el resto de mantenimiento industrial y de infraestructuras, merece la pena analizar el impacto de los gemelos digitales, la realidad virtual y ejemplificar las técnicas empleadas para su uso.

Para el caso de los gemelos digitales son representaciones digitales de equipamientos o procesos que permiten llevar a cabo simulaciones ajustadas a potenciales situaciones reales y que reducen los costes de ideación de soluciones además de acelerar los procesos de mantenimiento o modificaciones necesarias.

De cara a que el gemelo digital sea una representación lo más fidedigna del objeto real y que por tanto nos permita predecir con cierto grado de precisión sus comportamientos es necesario llevar a cabo un proceso de recogida de datos exhaustiva del objeto real. La naturaleza bidireccional en la creación del gemelo digital resulta de gran utilidad ya que permite iteración en la formación del gemelo digital y en los procesos que se lleven a cabo de las conclusiones de las simulaciones.

Las técnicas de digitalización que se están llevando a cabo y descritas anteriormente son de gran utilidad ya que son facilitadoras de poder llevar a cabo el análisis de datos necesario para la creación del gemelo digital y para la consecuente simulación.

A su vez los gemelos digitales cuentan con gran interacción a la hora de integrarse con tecnologías de realidad virtual. La integración entre las dos tecnologías permite por un lado crear programas para facilitar la asistencia remota con mucha mayor precisión al poder asistir sobre una copia digital del objeto real. Por otro lado, es también un desarrollo extenso para el entrenamiento a través de su uso en entornos virtuales que pueden replicar la operación real de los equipamientos.

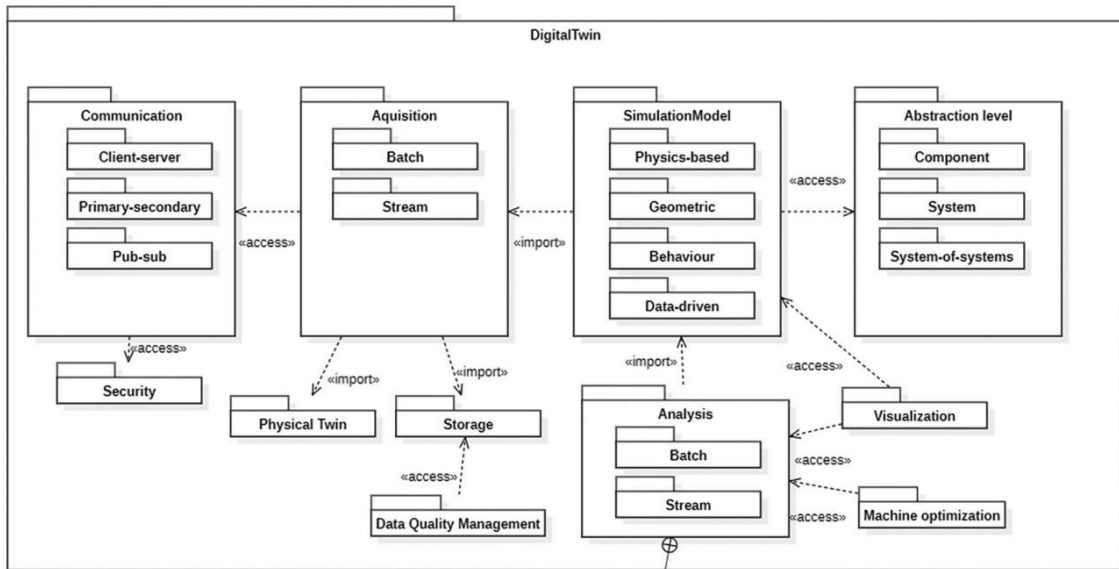


Figura 29: Diagrama de paquetes para un sistema de gemelo digital aplicado a mantenimiento predictivo [VANDINTER23]

El mantenimiento predictivo impulsado mediante simulaciones con gemelos digitales requiere de una integración eficaz de los sistemas. A la hora de determinar esta integración es necesario crear una arquitectura de referencia que permita que esta integración se lleve a cabo. Un estudio de 2023 realizó este estudio de arquitectura de referencia de la que se pudo concluir tres visiones diferentes sobre la implementación de los modelos con gemelos digitales al mantenimiento predictivo [VANDINTER23]. El documento además demuestra la aplicación del método de arquitecturas de referencia y su posible aplicación y diseño para otros contextos.

La Universidad Tecnológica de Lulea está explorando el concepto de aplicar el metaverso a la optimización y mejora ferroviaria. También se considera la aplicación de gemelos digitales como una forma de mejorar la eficiencia, la seguridad y la confiabilidad [GRR23,7].

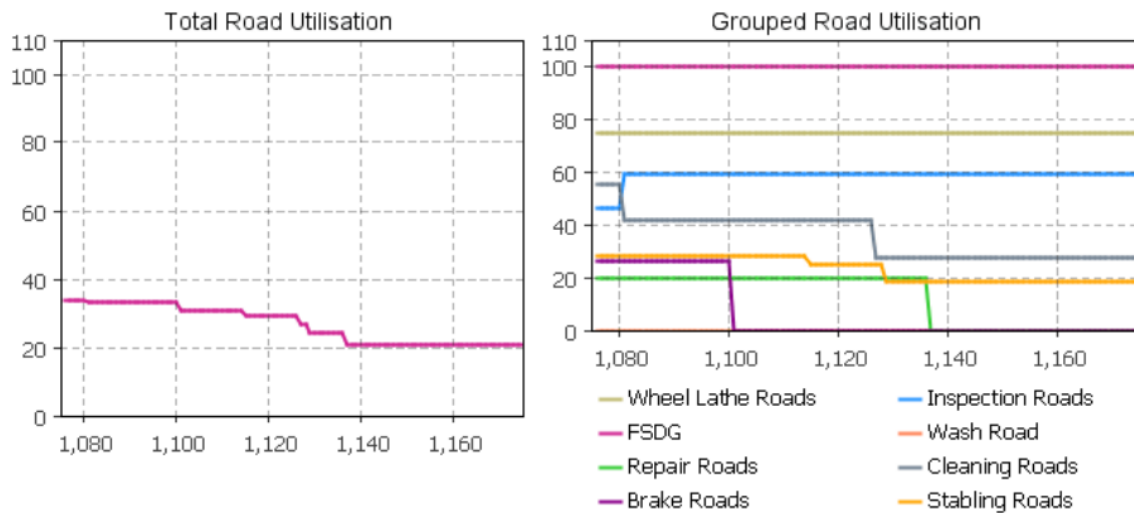


Figura 30: Utilización de los carriles de un taller de mantenimiento simulado [ANYLOGIC23,1]

El uso de las técnicas de simulación ha sido estudiado durante el trabajo, aunque su aplicación mediante los gemelos digitales tiene gran impacto. Advisian, una consultora, se encargó de modelar uno de los talleres de mantenimiento ferroviario más grandes de Australia. El taller contaba con problemas de congestión grandes y por tanto la simulación con parámetros físicos de operación del taller permitió determinar las técnicas más adecuadas para realizar la mejora [ANYLOGIC23,1].

Como parte del proyecto para la optimización de trenes financiado por la Comisión Europea (EU OPTIMISED) se llevó a cabo un estudio para analizar métodos y herramientas de planificación en diversos sectores industriales. En este proyecto se identificó como clave el uso de gemelos digitales para poder integrarse en el mantenimiento predictivo.

Dentro de este proyecto general de la Comisión Europea se llevó a cabo un estudio de la flota de ALSTOM en la Línea Costera Occidental del Reino Unido (WCML). En esta línea se encuentran cinco talleres de mantenimiento en las que se realizan las operaciones diarias necesarias, los regímenes de mantenimiento, inspecciones y el mantenimiento correctivo y aprovisionamiento de las piezas necesarias [ANYLOGIC23,2]



Figura 31: Localización de los talleres de mantenimiento de Alstom en la WCML  
[ANYLOGIC23,2]

Debido a la complejidad de los parámetros a considerar se optó por realizar una simulación, pero debido a insuficiencia de estos parámetros simulados se optimizó el modelo con la inclusión de gemelos digitales. Los gemelos digitales no solo permiten que el modelo sea más completo a nivel de inputs sino también mantener actualizados los parámetros al estado real de la flota con actualizaciones diarias que hacen mucho más fácil la actualización de las estrategias de mantenimiento y los calendarios de acuerdo con la situación que se encuentra en desarrollo.

El soporte que da este modelo con integración de los gemelos digitales no solo se encuentra en la optimización de las estrategias de mantenimiento, sino que también ha demostrado extrema utilidad a la hora de participar en subastas. La información actualizada de la operativa que se puede esperar de la flota ayuda en las decisiones en corto y largo plazo y por tanto se encuentra más fundamentada.

Aplicaciones más específicas de los gemelos digitales se pueden encontrar también en componentes específicos y no solo en la gestión de los activos a nivel macro. Como parte del XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica se propuso el uso de gemelos digitales para la digitalización del mantenimiento ferroviario integrado en la industria 4.0.

La simulación se centra en dos locomotoras con dos bogíes cada una. Estos bogíes se simulan mediante el uso de gemelos digitales para predecir las fallas y el estado de las piezas en un modelo. Se pueden detectar defectos muy pequeños y otras irregularidades.

La segunda solución innovadora de este apartado se enmarca en la realidad virtual. Como se ha comentado anteriormente la realidad virtual encuentra una integración natural con los gemelos digitales y otras técnicas de simulación además de necesitar de una digitalización centralizada e integrada entre los sistemas.

La asistencia remota representa una técnica que mejora la respuesta a incidencias de complejidad añadida que requieren intervención externa al taller y mejora los tiempos de respuesta dentro del mantenimiento.

Su aplicación para el entrenamiento y la operación del mantenimiento en directo es múltiple. Por un lado, permite el entrenamiento con simulaciones de objetos reales en gemelos digitales lo que da mucha flexibilidad y eficiencia a los procesos de entrenamiento. Adicionalmente, la realidad virtual representa un complemento para los entrenamientos de seguridad ya que permite la simulación de operaciones de mantenimiento sobre las que entrenar sin crear exposición en áreas peligrosas y por tanto minimizando la probabilidad de la ocurrencia de accidentes.

Por último, la realidad virtual permite aumentar la productividad de las estrategias de mantenimiento en operación al dotar a la plantilla de herramientas visuales e interactivas con las que agilizar la ejecución además de permitir que la planificación de futuras intervenciones sea más adecuada. La aplicación de esta solución es también de utilidad para adaptarse a entornos cambiantes que permiten reflejar el estado de la infraestructura y los equipamientos con mayor precisión.

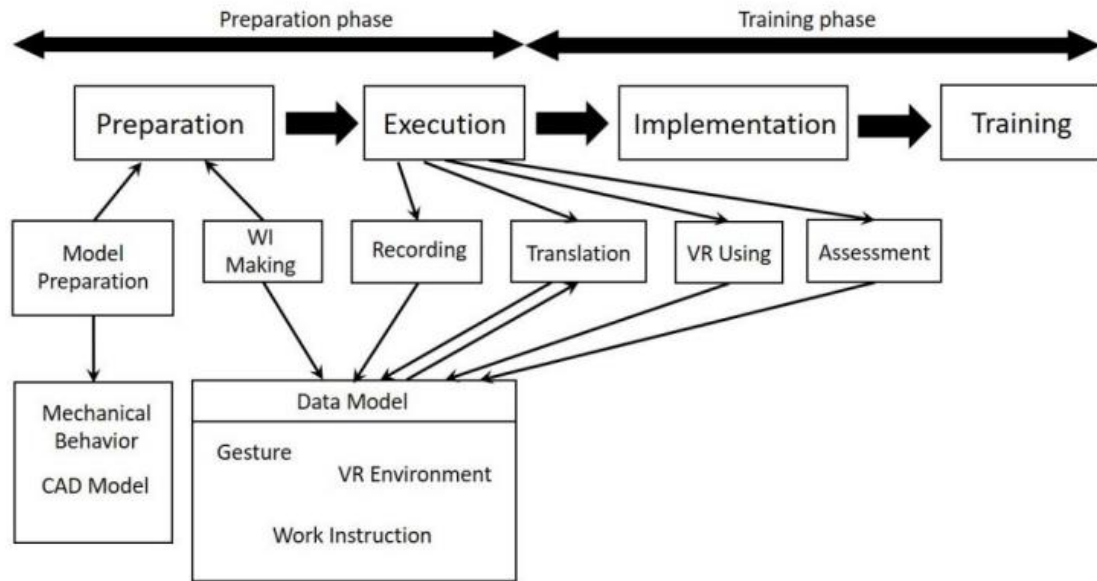


Figura 32 Proceso sistemático para implementar la realidad virtual al entrenamiento en procesos de mantenimiento [NUMFU19]

En un estudio de 2019 se llevó a cabo una esquematización del proceso de implementación de los modelos de entrenamiento con realidad virtual. El proceso de mantenimiento específico se preparó para una sierra mecánica, pero es aplicable a los procesos de mantenimiento industriales y de mantenimiento ferroviario.

El proceso destaca que, aunque los usuarios mencionan preferir el uso sobre un sistema real esta consideración no es exclusiva y además la capacidad de contar con copias reales de muchos de los equipamientos a reparar para entrenamiento además de su actualización a las condiciones del presente dan una fundamentación fuerte al uso de la realidad virtual en el entrenamiento de la plantilla.

Los procesos sistemáticos se deben iniciar con la creación de los modelos que representaran los comportamientos físicos de los equipamientos sobre los que realizar el mantenimiento. Dependiendo de la sofisticación deseada se puede optar por realizar un gemelo digital dedicado lo cual puede ser de extremo interés cuando se quiere planear la tarea de mantenimiento de manera más específica para un equipamiento con condiciones reales consideradas.

La tarea de ejecución incluye los procesos que permiten la adaptación de los modelos digitales desarrollados a ser utilizados mediante realidad virtual. El grabado de los datos de la fase de preparación, la adaptación de los datos provenientes del modelo a datos del

programa y el uso de la realidad virtual son fases necesarias e iterativas para garantizar una futura implementación de la realidad virtual para el entrenamiento.

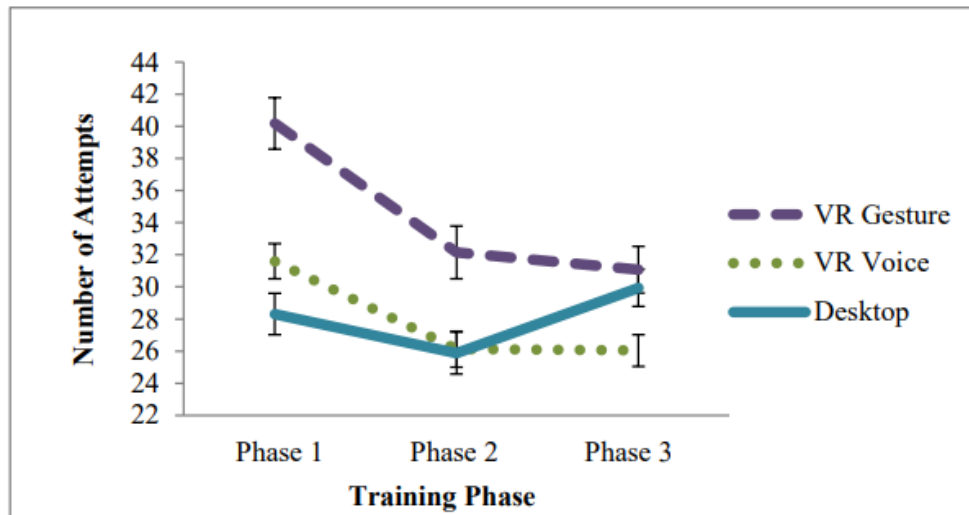


Figura 33: Número de pasos necesarios para el mantenimiento de un alternador [BAILEY17]

Los resultados de un estudio de 2017 demostraron que, aunque el entrenamiento en ordenador era superior en términos de velocidad la calidad del entrenamiento era menor y al quitar las ayudas durante el proceso en la fase 3 y realizar el mantenimiento del alternador los indicadores empeoraban considerablemente. El estudio reconoce que no recoge parámetros para valorar la calidad de la ejecución la cual teorizan que se podría haber visto influenciada positivamente por el uso de tecnologías de realidad virtual [BAILEY17].

Otro estudio de 2022 analizó el proceso de aplicación de realidad virtual para la operación con equipamiento industrial enfocado al mantenimiento y demuestra la eficacia de la preparación de estos sistemas con una visión analítica y programada. Los resultados identifican técnicas separadas para los diferentes procesos como ideales y mejoran la especialización del entrenamiento con la realidad virtual [LIU22].





# Aplicación Práctica

En este apartado se lleva a cabo una aplicación práctica breve de las técnicas estudiadas sobre un taller real a nivel de ejemplificación de soluciones posibles aplicables.

Por razones de confidencialidad la planta de aplicación se considera con detalles reales pero los parámetros con los que se estudia se mantienen de manera orientativa. La planta de estudio se encuentra en la red ferroviaria europea. La zona es una zona de alta congestión por transporte de mercancías y cuenta con unos de los costes de mantenimiento más elevados de la zona por retrasos de sus operaciones.

A nivel medioambiental el taller no se encuentra entre los mejores por consumo energético y emisiones en sus operaciones. La planta no cuenta con un nivel elevado de accidentes, aunque la mano de obra esta envejeciendo.

Las diferentes propuestas de mantenimiento predictivo y técnicas de industria 4.0 se han llevado en diferentes procesos de modernización y la estructura de datos no se encuentra centralizada. Además, la monitorización es insuficiente y su rentabilidad económica en duda lo que ha afectado a la aplicación por parte de los trabajadores de estas técnicas que las consideran como innecesarias.

La resolución de las propuestas de este caso práctico se puede dividir en tres aportaciones diferenciadas. El primer aspecto a mejorar es realizar una serie de propuestas de cara a mejorar la sostenibilidad de la planta lo cual redundará directamente a su vez en los costes de operación y por último también mejora el atractivo de la planta de cara a captar talento y mejorar la percepción externa y de los trabajadores de la planta.

El segundo aspecto a considerar es las mejoras a conseguir en materia de costes a través de la digitalización completa de la planta mediante la aplicación de técnicas de monitorización, mantenimiento predictivo y centralización de los datos desarrolladas durante el trabajo.

Por último, se debe llevar a cabo un proceso de recomendación del trabajo a llevar a cabo para simplificar el funcionamiento de la planta y mejorar la congestión en la red, facilitando un mejor rendimiento económico mediante técnicas de aplicación estudiadas.

Para la resolución del primer aspecto medioambiental la planta debe aprovechar su posición especial de regímenes favorables para la implementación de medidas medioambientales. La transición en la planta se debe llevar a cabo a través de dos pilares principales.

Por un lado, la identificación de mejoras de eficiencia interna en las instalaciones eléctricas y mecánicas de la planta. Durante el desarrollo del trabajo se ha ejemplificado desarrollos potenciales de aplicación como la iluminación LED o los convertidores eficientes pero un análisis profundo es recomendable para conseguir realizar las inversiones necesarias de manera integrada aprovechando sinergias entre sistemas. El impacto principal de estas medidas es en los indicadores medioambientales, pero también tiene un efecto positivo sobre los costes.

Por otro lado, la identificación de las regulaciones relevantes a través de consulta con instituciones públicas o de consultoría para utilizar las superficies posibles de las instalaciones para la generación de energía renovable que permita la reducción de costes y de emisiones indirectas de las operaciones de la instalación. Ampliar las instalaciones para la operación de trenes con baterías y el propio desarrollo de unas baterías de consumo para la planta es recomendable.

La inestabilidad de precios generada en los mercados por la inseguridad en el suministro de los combustibles fósiles además de las imprecisiones a la hora de casar generación y demanda en las fuentes renovables intermitentes generan una serie de costes extra a la planta que merecen un análisis particular para sopesar un modelo de alquiler de una instalación de baterías para uso particular del taller.

En el aspecto de la reducción de gastos a través de la monitorización, mantenimiento predictivo y centralización de los datos desarrolladas durante el trabajo. Los procesos a llevar a cabo son los mismos estudiados ya durante los apartados relevantes.

La labor de digitalización en su conjunto debe llevarse a cabo de una manera centralizada que permita la integración de todos los sistemas. La decisión de que componentes

requieren de sensores e identificar las mejores prácticas posibles en materia de agregación de datos son vitales y agrupan una gran cantidad del coste total de las labores de análisis de datos para el mantenimiento predictivo. Una arquitectura eficiente para la implementación del modelo digital y su integración es necesaria.

Como pasos necesarios la realización de una matriz de cobertura de datos permite visibilizar, con el análisis de todas las combinaciones posibles de ejemplos, las condiciones a estudiar de cara a realizar los diferentes mantenimientos predictivos. A su vez, la realización de un plan de instrumentación (IP), por el que se definan todos los aspectos referentes a los aparatos requeridos y las comunicaciones por su tipo, es un componente importante para estructurar el protocolo de mantenimiento predictivo.

Como se describió en la fase relevante la creación de un protocolo de recolección de datos es un componente recomendable. El protocolo sigue las fases del proceso que se deben seguir para llevar a cabo la recolección de datos. Se enforca en los pasos referentes a la calibración de dispositivos, el periodo de pruebas y como los resultados de los datos serán recolectados, almacenados y manipulados.

Tras la realización y definición de los pasos relevantes las fases del análisis de datos necesarias para un mantenimiento predictivo adecuado se deben considerar. En esta fase se debe analizar la conveniencia y posibilidad de aplicar gemelos digitales a los componentes relevantes para poder reducir aún más los costes de reparación al anticipar las incidencias de manera más dinámica.

La aplicación de técnicas de robotización puede seguir el modelo de aplicación definido durante el apartado de automatización por el que se realiza un proceso de revisión adecuada de los procesos que se llevan a cabo mediante evidencia en vídeo, manuales de mantenimiento en uso y otros datos es necesario para dimensionar el alcance del trabajo a realizar además de determinar los modelos de robotización pertinentes.

Todas estas aplicaciones de automatización y mantenimiento predictivo apoyadas por los gemelos digitales tendrían impacto directo sobre todos los indicadores de costes al reducir la incidencia de las fallas, sus costes indirectos y minimizar sus costes directos al realizar los mantenimientos en el momento adecuado. Los indicadores de disponibilidad y fiabilidad también se ven impactados ya que la superior operativa reduce los tiempos además de aumentar la disponibilidad de los trenes.

De cara a solucionar el impacto sobre la plantilla en envejecimiento la modernización de los procesos mediante la automatización mejora las condiciones de los trabajadores y por tanto impacta en los indicadores de capital humano.

En este esfuerzo es relevante apoyar la iniciativa en las tecnologías de realidad virtual que permiten una mejora consistente de los entrenamientos a realizar en su eficacia. Además, la capacidad de realizar mantenimientos asistidos de manera remota con realidad virtual flexibiliza la capacidad de la plantilla para atacar mantenimientos complejos con ayuda externa.

Por último, para la reducción de la congestión en la planta se deben considerar las técnicas desarrolladas en el apartado de mejoras logísticas. Las técnicas desarrolladas para la reducción de costes también tienen un efecto de reducción de la congestión por su efecto sobre la incidencia de fallas y la anticipación de fallas graves.

El proceso de mejora de las consideraciones logísticas del taller parte primero por un estudio de la capacidad del taller para llevar a cabo procesos de mantenimiento y crear un modelo que pueda realizar las simulaciones de ocurrencias necesarias tanto para el caso específico como para su extrapolación a una red más grande. Un modelo de optimización apoyado en los gemelos digitales también permite una coordinación mayor y una previsión de las expectativas mejores.

Como se ha desarrollado en el apartado relevante, con la introducción del análisis de datos avanzado y la mejora considerable de la transmisión de información entre los diferentes actores la operativa de mantenimiento se convierte en una operativa paralela. Los diferentes agentes involucrados en el mantenimiento para la provisión de piezas, la gestión de la flota y la realización del mantenimiento deben mantenerse coordinados mediante técnicas de gestión de datos para poder realizar una labor eficiente.

Por último, se debe de llevar a cabo un análisis de la capacidad de llevar a cabo reparaciones en marcha de cara a poder descongestionar los talleres principales de reparaciones de mayor necesidad además de permitir que trenes que se encuentran con fallas menores puedan retornar a operación con la mayor antelación y reducir los sobrecostes generados por su parada.

La posición específica del taller, su rol comparativo con talleres más grandes de la zona y la incidencia de cierta tipología de fallas en esa zona son razones de peso para valorar una distribución del taller hacia poder gestionar una capacidad mayor de reparaciones en marcha.



# Conclusión

Durante la realización del estudio se ha podido valorar el desarrollo de numerosas técnicas y se ha garantizado la aportación mediante la síntesis de estas, su parametrización mediante indicadores relevantes de rendimiento con los que valorar su impacto y una aplicación específica a un taller de mantenimiento similar a otros casos de estudio mencionados durante el trabajo.

Por ello y a nivel de resumir algunas de las conclusiones que se han conseguido merece la pena mencionar componentes relevantes del estudio tanto por su metodología utilizada y trabajo exhaustivo realizado de investigación como por la determinación de indicadores relevantes aplicables a casos de transformación innovadores futuros en el mantenimiento ferroviario.

La metodología engloba los procesos llevados a cabo para la recolección de la información relevante, su procesamiento y presentación. Además, también se puede integrar en este aspecto los métodos utilizados para determinar los indicadores. La metodología por indicadores principales demuestra su capacidad al ser capaz de identificar una gran cantidad de trabajos relevantes con gran precisión. A su vez la capacidad de filtrar a través de algebra booleana permite discriminar otros estudios aplicados a otras áreas para algunas de las técnicas estudiadas.

Los indicadores permiten un marco útil con el que valorar oportunidades de análisis de mejora futuros además de enfocarse en un alcance más holístico al englobar una diversidad de tipologías en vez de enfocarse solo en parámetros de coste o técnicos.

Las técnicas estudiadas demuestran la diversidad de desarrollos en transcurso y su profundidad. Además, el análisis llevado a cabo durante el trabajo, apoyado en la experiencia sobre el sector adquirida, permite conseguir una visión acertada de las expectativas en la mejora del mantenimiento ferroviario y una aproximación mejor al sector.

La aplicación práctica armoniza las técnicas estudiadas y su aplicación con los indicadores y con la descripción de una planta con prioridades claras de mejoras. A su vez, el desarrollo de este proceso de aplicación práctica permite que las conclusiones conseguidas en materia de técnicas e indicadores sean fácilmente replicables en estudios posteriores con consideraciones iniciales diferentes.



# Bibliografía

## Objetivos de Desarrollo Sostenible:

- [ESREL22] 32nd European Safety and Reliability Conference (2022) Climate change impact assessment on railway maintenance <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1702815/FULLTEXT01.pdf>
- [SUDHIR16] SUDHIR, L, S (Marzo, 2016) LED ILLUMINATION: A CASE STUDY ON ENERGY CONSERVATION <https://pnrsolution.org/Datacenter/Vol4/Issue2/39.pdf>
- [RTE23] RTÉ News. (2023, 31 agosto). Five maintenance workers killed in Italy train incident. RTE.ie. <https://www.rte.ie/news/world/2023/0831/1402591-italy-railway-workers/>
- [EVANS20] EVANS. A. W (Mayo, 2020) FATAL TRAIN ACCIDENTS ON EUROPE'S RAILWAYS: 1980-2019 [https://www.bing.com/ck/a?!&p=54c38f737dc0a451JmltdHM9MTcwMzcyMTYwMCZpZ3VpZD0zMzlmZGRlZS00MTYyLTYyMjEtMzVhNS1jZjhiNDA0OTYzODYmaW5zaWQ9NTE5Nw&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=339fddee-4162-6221-35a5-cf8b40496386&psq=evolution+of+train+accidents&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cuYW1wZXJpYWwuYWMudWsvGVvcGxIL2EuZXZhbnMvZG9jdW1lbnQvNzI4My9GVEFFMjAxOS8\\_RIRBRTIwMTkucGRm&ntb=1](https://www.bing.com/ck/a?!&p=54c38f737dc0a451JmltdHM9MTcwMzcyMTYwMCZpZ3VpZD0zMzlmZGRlZS00MTYyLTYyMjEtMzVhNS1jZjhiNDA0OTYzODYmaW5zaWQ9NTE5Nw&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=339fddee-4162-6221-35a5-cf8b40496386&psq=evolution+of+train+accidents&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cuYW1wZXJpYWwuYWMudWsvGVvcGxIL2EuZXZhbnMvZG9jdW1lbnQvNzI4My9GVEFFMjAxOS8_RIRBRTIwMTkucGRm&ntb=1)
- [DURSUN20] Dursun, E., Neşe, S. V., & Kılıç, B. (2020). Green Building Certification of urban public railway transport systems for sustainable cities. Balkan journal of electrical & computer engineering, 8(1), 7-15. <https://doi.org/10.17694/bajece.649183>
- [MCKINSEY17] McKinsey (Diciembre, 2017) The rail sector's changing maintenance game How rail operators and rail OEMs can benefit from digital maintenance opportunities <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Public%20and%20Social%20Sector/Our%20Insights/The%20rail%20sectors%20changing%20maintenance%20game/The-rail-sectors-changing-maintenance-game.pdf>

## Introducción y Desafíos:

- [BMK20] EU rail freight corridors. (s. f.). [https://www.bmk.gv.at/en/topics/mobility/transportation/international\\_eu/publications/rail-freight-corridors.html](https://www.bmk.gv.at/en/topics/mobility/transportation/international_eu/publications/rail-freight-corridors.html)
- [EUP23] Perspectives for the rolling stock supply in the EU (Julio 2023). [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/747263/IPOL\\_STU\(2023\)747263\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/747263/IPOL_STU(2023)747263_EN.pdf)

- [GRR23,1] Global Railway Review. (2023, 1 noviembre). Railway Transformation: Data-Driven Sustainability - Global Railway Review. <https://www.globalrailwayreview.com/webinar/146175/railway-transformation-data-driven-sustainability/>
- [RSM&DO23] Rolling Stock Maintenance & Depot Optimisation 2023. (2023). <https://www.rolling-stock-maintenance.com/>
- [BIDSTATS23] UK – tender notices. (2023). <https://bidstats.uk/tenders/?ntype=tender>

#### Metodología y Estado del Arte:

- [VINUTHA23] Vinutha. M. S., Padma. M. C. (2023, 2 Noviembre) Insights into Search Engine Optimization using Natural Language Processing and Machine Learning [https://thesai.org/Downloads/Volume14No2/Paper\\_11-Insights\\_into\\_Search\\_Engine\\_Optimization.pdf](https://thesai.org/Downloads/Volume14No2/Paper_11-Insights_into_Search_Engine_Optimization.pdf)

#### Indicadores Principales de Rendimiento:

- [IDRIS22] Idris, M. F. M., Saad, N. H., Yahaya, M. I., Shuib, A., Mohamed, W. A. N. W., & Amin, A. N. M. (2022). Cost of rolling stock maintenance in Urban Railway Operation: Literature review and direction. pertanika journal of science and technology, 30(2), 1045-1071. <https://doi.org/10.47836/pjst.30.2.11>
- [RODRIGUEZ23] Rodriguez, J., McConachie, N., Doshi, P., Schaar, D., Pahl, M., Ullrich, P., Omar, M., & Prasad, V. (2023, 20 noviembre). A digital approach to rolling stock maintenance. BCG Global. <https://www.bcg.com/publications/2023/a-digital-approach-to-rolling-stock-maintenance>
- [UGT22] UGT. (febrero, 2022) Análisis de las cifras provisionales de accidentes de trabajo 2021 [https://www.ugt.es/sites/default/files/17-02\\_informe\\_datos\\_at\\_2021\\_0.pdf](https://www.ugt.es/sites/default/files/17-02_informe_datos_at_2021_0.pdf)
- [DELOITTE22] Deloitte and the Manufacturing Institute: Big gains in perceptions of US manufacturing as innovative, critical and high tech. (s. f.). Deloitte United States. <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/about-deloitte/articles/press-releases/deloitte-and-the-manufacturing-institute-big-gains-in-perceptions-of-us-manufacturing-as-innovative-critical-high-tech.html>

#### Tecnologías y Soluciones Verdes:

- [HITACHI12] Hitachi (julio, 2012) LED Lighting System for Rolling Stock [https://www.hitachi.com/rev/pdf/2012/r2012\\_07\\_108.pdf](https://www.hitachi.com/rev/pdf/2012/r2012_07_108.pdf)

- [ST21] New Link Light Rail trains rolling into service! | Sound Transit. (2021, 14 mayo). <https://www.soundtransit.org/blog/platform/new-link-light-rail-trains-rolling-service>
- [MALGORZATA21] Małgorzata, C. Witold, B and Sebastian, J. (2021) Railway Vehicle Energy Efficiency as a Key Factor in Creating Sustainable Transportation Systems  
<https://www.bing.com/ck/a?!&&p=5bead88c989040edJmltdHM9MTcwMjc3MTIwMCZpZ3VpZD0zMzlmZGRlZS00MTYyLTYyMjEtMzVhNS1jZjhiNDA0OTYzODYmaW5zaWQ9NTM5Mw&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=339fddee-4162-6221-35a5-cf8b40496386&psq=effect+of+metering+energy+rail&u=a1aHR0cHM6Ly9tZH BpLXJlcy5jb20vZF9hdHRhY2htZW50L2VuZXJnaWVzL2VuZXJnaWVzLTE0LTA1MjExL2FydGlibGVfZGVwbG95L2VuZXJnaWVzLTE0LTA1MjExLX YzLnBkZj92ZXJzaW9uPTE2Mjk3OTc1ODY&ntb=1>
- [HITACHI23] Battery powered trams | Hitachi Rail. (s. f.). <https://www.hitachirail.com/products-and-solutions/battery-powered-trains/battery-powered-trams/>
- [AICHe22] A look at Hydrogen-Fueled passenger trains. (2022, 8 diciembre). AICHe. <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2022/december/look-hydrogen-fueled-passenger-trains>
- [WESTERN21] Western, N., Kong, X., & Erden, M. (2021). Design of a train cleaning robot for the train carriage interior. Procedia CIRP, 100, 804-809. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.040>
- [RENFE23] Energy efficiency. (s. f.). <https://www.renfe.com/es/en/renfe-group/sustainable-transport/energy-efficiency>
- [MARIANI22] Mariani, V., Rizzo, G., Tiano, F. A., & Glielmo, L. (2022). A model predictive control scheme for regenerative braking in vehicles with hybridized architectures via aftermarket kits. Control Engineering Practice, 123, 105142. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105142>
- [RN21] Railway-News. (2021, 16 septiembre). Train maintenance with electricity from solar power plant | VR Fleetcare. <https://railway-news.com/train-maintenance-with-electricity-from-solar-power-plant/>

#### Contratos de Mantenimiento:

- [VIT23] VIT (2023) Brochure on Services offered. [https://www.globalrailwayreview.com/wp-content/uploads/Brosura\\_vzdrzevanje\\_2023\\_splet\\_book.pdf](https://www.globalrailwayreview.com/wp-content/uploads/Brosura_vzdrzevanje_2023_splet_book.pdf)
- [GRR23,2] Global Railway Review. (2023a, junio 29). Alstom and Northrail sign contract for 50 Traxx locomotives. <https://www.globalrailwayreview.com/news/145217/alstom-and-northrail-sign-contract-for-50-traxx-locomotives/>
- [GRR23,3] Global Railway Review. (2023b, julio 11). Alpha Trains and Siemens Mobility signed Vectron service contract.

- <https://www.globalrailwayreview.com/news/145321/alpha-trains-and-siemens-mobility-sign-vectron-service-contract/>
- [RR19] Rail Research. (2019, 17 abril). More efficient traction systems for ever-greener trains. Europe's Rail. <https://rail-research.europa.eu/news/more-efficient-traction-systems-for-ever-greener-trains/>
  - [SIEMENS21] Turnkey Rail Solutions. (2021). Siemens Mobility Global. <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/turnkey-rail-solutions.html>
  - [ALSTOM23,1] ALSTOM (Julio, 2023) The ORA Consortium, led by RATP Dev, wins the contract to operate and maintain Line 15 South of the Grand Paris Express public transit network. [https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2023/07/18/20230718\\_PR%20ORA Attribution Line 15 EN.pdf](https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2023/07/18/20230718_PR%20ORA%20Attribution%20Line%2015%20EN.pdf)
  - [IHM13] IHM Notes (2013) Contract Maintenance <https://www.ihmnotes.in/assets/Docs/Sem-1/HE/unit%2013%20Contract%20Maintance.pdf>
  - [ALSTOM23,2] Train Operations & System Maintenance: Increased value and performance. (2023). Alstom. <https://www.alstom.com/solutions/services/train-operations-system-maintenance-increased-value-and-performance>
  - [HITACHI21] Hitachi (Octubre, 2021) Hitachi Rail secures maintenance contract from ILSA [Hitachi Rail secures maintenance contract from ILSA \(rail\)](#)

#### Mantenimiento Predictivo e Industria 4.0:

- [MP21] Maintenance stages of rolling stock. (2021, Enero). ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Maintenance-stages-of-Rolling-Stock\\_tbl1\\_348655526](https://www.researchgate.net/figure/Maintenance-stages-of-Rolling-Stock_tbl1_348655526)
- [SIMONE23] De Simone, L., Caputo, E., Cinque, M., Galli, A., Moscato, V., Russo, S., Cesaro, G., Criscuolo, V., & Giannini, G. (2023). LSTM-based failure prediction for railway rolling stock equipment. Expert Systems with Applications, 222, 119767. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119767>
- [KISTLER21] Kistler. (2021) Industry 4.0. [961-519e.pdf \(celum.cloud\)](#)
- [GRR23,5] Global Railway Review. (2023a, junio 19). Irish Rail: providing greater levels of capacity and resilience. <https://www.globalrailwayreview.com/article/144966/upgrading-systems-to-provide-greater-levels-of-capacity-and-resilience/>
- [RENESAS23] Renesas (2023) White Paper, Data Collection for Edge AI / Tiny ML with Sensors. <https://www.renesas.com/us/en/document/whp/data-collection-edge-ai-sensors>
- [TRACTIAN23] Las mejores técnicas de mantenimiento predictivo - TRACTIAN. (2023). <https://tractian.com/es/blog/tecnicas-de-mantenimiento-predictivo-utilizadas-en-la-industria>

#### Mejoras Logísticas:

- [RN23] Railway-News. (2023, 27 abril). New maintenance facility for rolling stock. <https://railway-news.com/new-maintenance-facility-for-rolling-stock/>
- [INTERRAIL23] Travel disruptions in Europe. (2023). <https://www.interrail.eu/en/support/travel-disruptions>
- [ANYLOGIC23,1] Railway maintenance yard design and simulation for an Australian railcar maintenance provider. (s. f.). <https://www.anylogic.com/resources/case-studies/railway-maintenance-yard-design-and-simulation-for-an-australian-railcar-maintenance-provider/>
- [MCKINSEY17] McKinsey (Diciembre, 2017) The rail sector's changing maintenance game How rail operators and rail OEMs can benefit from digital maintenance opportunities <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Public%20and%20Social%20Sector/Our%20Insights/The%20rail%20sectors%20changing%20maintenance%20game/The-rail-sectors-changing-maintenance-game.pdf>
- [HUM21] HUM Industrial Technology. (2021). <https://www.humindustrial.com/post/running-away-with-repairs>

#### Automatización:

- [HUDDERSFIELD23] Launch of the Smart Rolling Stock Maintenance Research Facility - University of Huddersfield. (2023, Abril). University of Huddersfield. <https://www.hud.ac.uk/news/2023/april/smart-rolling-stock-maintenance-research-facility/>
- [GRR23,4] Global Railway Review. (2023c, julio 18). Northern developing app to check when trains were last cleaned. <https://www.globalrailwayreview.com/news/145401/northern-developing-app-to-check-when-trains-were-last-cleaned/>
- [GRR23,6] Global Railway Review. (2023b, junio 20). Utilising digitalisation to streamline asset management. <https://www.globalrailwayreview.com/article/145056/utilising-digitalisation-to-streamline-asset-management/>
- [TAO22] Tao, Y. (2022). Quality analysis of railroad train shunting Operation Plan using the Intelligent Body Model. Advances in multimedia, 2022, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2022/4441369>
- [RSM&DO23] Rolling Stock Maintenance & Depot Optimisation 2023. (2023). <https://www.rolling-stock-maintenance.com/>
- [VITHANAGE17] Vithanage. R. K, Harrison C. S, DeSilva A. K. (2017) A Study on Automating Rolling-stock Maintenance in the Rail Industry using Robotics [64107.pdf \(scitepress.org\)](https://scitepress.org/64107.pdf)

- [MECALUX] Mecalux. (s. f.-b). Mecalux develops a warehouse type that suits all Renfe maintenance centres. <https://www.mecalux.com/case-studies/example-automated-warehouses-renfe-spain>
- [CMADRID23] The Community of Madrid has inaugurated today the new Metro logistics center, a pioneering automatic warehouse in Spain for maintenance of trains and facilities throughout the underground network, using the most innovative technology in the sector. The Minister of Transport and Infrastructure, David Pérez, has visited these facilities, located in the railway company's Canillejas depot, where the Central Workshops are also located. (2023, 14 marzo). Comunidad de Madrid. <https://www.comunidad.madrid/en/noticias/2023/03/14/comunidad-madrid-estrena-almacen-automatico-pionero-espana-mantenimiento-red-metro>
- [VITHANAGE19] Vithanage. R. K, Harrison C. S, DeSilva A. K. (2019) Importance and applications of robotic and autonomous systems (RAS) in railway maintenance sector: a review [https://researchonline.gcu.ac.uk/ws/portalfiles/portal/33573374/computers\\_08\\_00056\\_1.pdf](https://researchonline.gcu.ac.uk/ws/portalfiles/portal/33573374/computers_08_00056_1.pdf)
- [INDU21] Induportals Media Publishing. (2021, 20 octubre). KEEPING RAILCARS MOVING: DIGITALIZATION OF MAINTENANCE WORKSHOPS MOVING AHEAD AT FULL SPEED. Railway International. <https://www.railway-international.com/news/47706-keeping-railcars-moving-digitalization-of-maintenance-workshops-moving-ahead-at-full-speed>
- [ULRICH20] Ullrich, P., Schierholz, H., Davey, R., & Silvestri, P. (2021, 9 febrero). Digital maintenance can unlock growth in rail. BCG Global. <https://www.bcg.com/publications/2020/how-digital-maintenance-can-create-value-for-rail-operators>

#### Gemelos Digitales y Realidad Virtual:

- [GRR23,7] Global Railway Review. (2023f, julio 27). Riding the 'Metaverse Express': The future of railway transportation in a virtual world. <https://www.globalrailwayreview.com/article/145516/riding-the-metaverse-express-the-future-of-railway-transportation-in-a-virtual-world/>
- [VANDINTER23] Van Dinter. R, Tekinerdogan. B, Catal. C (2023) Reference architecture for digital twin-based predictive maintenance systems <https://edepot.wur.nl/588955>
- [ANYLOGIC23,1] Railway maintenance yard design and simulation for an Australian railcar maintenance provider. (s. f.). <https://www.anylogic.com/resources/case-studies/railway-maintenance-yard-design-and-simulation-for-an-australian-railcar-maintenance-provider/>
- [ANYLOGIC23,2] Alstom develops a rail network digital twin for railway yard design and predictive fleet maintenance. (s. f.-b). <https://www.anylogic.com/resources/case-studies/digital-twin-of-rail-network-for-train-fleet-maintenance-decision-support/>

- [BUSTOS23] Bustos, A., Rubio, H., Castejón, C., Heras, E. S., & García-Prada, J. C. (2023). Towards digitalizing rolling stock maintenance. En Springer eBooks (pp. 418-424). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-38563-6\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-031-38563-6_61)
- [NUMFU19] Numfu, M., Riel, A., & Noël, F. (2019). Virtual reality based digital chain for maintenance training. *Procedia CIRP*, 84, 1069-1074. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.268>
- [BAILEY17] Bailey S, Johnson C. I, Schroeder B. L, Marraffino M. D. (2017) Using Virtual Reality for Training Maintenance Procedures <https://www.interplaylearning.com/hubfs/Blog/Case%20Studies/Using%20Virtual%20Reality%20for%20Training%20Maintenance%20Procedures.pdf>
- [LIU22] Liu, X., Li, C., Dang, S., Wang, W., Qu, J., Chen, T., & Wang, Q. (2022). Research on training Effectiveness of professional maintenance personnel based on virtual reality and augmented reality technology. *Sustainability*, 14(21), 14351. <https://doi.org/10.3390/su142114351>