

Propuesta de Aplicación de nuevos sistemas mediante el IoT, para el desarrollo del Mantenimiento Predictivo en las Infraestructuras y Sistemas Ferroviarios de Alta Velocidad.

Implementation proposal of new systems through IoT, to develop the Predictive Maintenance in the High Speed Railways Infrastructures & Systems.

Israel Herrero Sánchez¹

Resumen: La infraestructura y superestructura ferroviaria son un sistema complejo con una larga vida útil. Su desempeño dependerá de las decisiones de mantenimiento y renovación que se lleven a cabo durante su ciclo de vida útil. En el escenario actual, la mayoría de las decisiones de mantenimiento se basan en la experiencia pasada y en las estimaciones de expertos mediante una combinación de tareas preventivas y correctivas con una baja implementación de mantenimiento predictivo.

El IoT es el componente tecnológico fundamental sobre el que sienta sus bases el paradigma de la Industria 4.0. La inclusión del IoT en el mantenimiento preventivo de las infraestructuras y sistemas ferroviarios intentará preservar la función de los equipos mediante la aplicación de estrategias eficientes de mantenimiento, inspección y control de los activos permitiendo optimizar la fiabilidad operacional, y la disponibilidad de las líneas ferroviarias maximizando de esta forma la rentabilidad de la explotación. Por ello se propone la aplicación de tecnologías inteligentes (IoT) mediante una red propia de Mantenimiento que permita optimizar el mantenimiento de la infraestructura y superestructura ferroviaria mediante una adecuada gestión de las operaciones basadas en técnicas de inteligencia computacional, desarrollando algoritmos que permitan definir los patrones, calcular las operaciones de los equipos y aprender sobre el ciclo de vida de los componentes instalados. En el artículo se representa y propone el uso de tecnologías novedosas de detección así como su aplicación en muchas áreas para supervisión y monitorización del estado de la infraestructura y superestructura ferroviaria. Se ha de tener en cuenta que toda la sensorica deberá cumplir unos mínimos de control de calidad para su funcionamiento a la intemperie así como disposición de las interfaces necesarias para su adaptación a la nueva red.

Palabras clave: Internet de las Cosas, (IoT), Infraestructura y Superestructura Ferroviaria, Mantenimiento Predictivo, CBM (Mantenimiento basado en la experiencia), RCM (Mantenimiento centrado en Fiabilidad), "Nube", Big Data, Inteligencia Artificial.

Abstract: Railway infrastructure and superstructure are a complex system with a long service life. Their performance will depend on the maintenance and renewal decisions that are made during their life cycle. In the current scenario, most maintenance decisions are based on past experience and expert estimates through a combination of preventive and corrective tasks with a low predictive maintenance implementation.

IoT is the fundamental technological component on which the paradigm of Industry 4.0 is based. The inclusion of IoT in preventive maintenance of railway infrastructures and systems will seek to preserve the role of the teams by applying efficient maintenance, inspection and asset control strategies to optimize operational reliability and the availability of railway lines by maximizing in this way the profitability of the operation. For this reason, the application of intelligent technologies (IoT) is proposed through an own maintenance network that allows to optimize the maintenance of the railway infrastructure and superstructure through an adequate management of the operations based on computational intelligence techniques, developing algorithms that allow to define the patterns, calculate the operations of the equipment and learn about the life cycle of the installed components. The article represents and proposes the use of innovative detection technologies as well as their application in many areas for supervision and monitoring of the state of the infrastructure and railway superstructure. It must be taken into account that all the sensorics must comply with minimum quality control for its operation outdoors and the necessary interfaces to adapt it to the new network.

Keywords: Internet of Things (IoT), Railway Infrastructure and Superstructure, Predictive Maintenance, CBM (Condition Based Monitoring/Maintenance), RCM (Reliability Centred Maintenance), Cloud Computing, Big Data, Business Intelligent.

¹ iherrerosa@gmail.com. Ingeniero Técnico Industrial - UPCO (ICAI), PMP®, Master Universitario en Gestión de Infraestructuras y Sistemas Ferroviarios - UEM.

1. Introducción

La infraestructura y superestructura ferroviaria es un sistema complejo. Un aspecto importante de la misma es que los activos tienen una larga vida útil, y una vez instalado, es muy difícil modificar el diseño inicial. Por ello, el desempeño de ambas depende de las decisiones de mantenimiento y renovación que se toman durante su ciclo de vida. En muchos países, la reestructuración de los ferrocarriles y el aumento de los requisitos de eficiencia provocan un entorno cambiante para la gestión de la infraestructura.

Debido al aumento de los costos de operación y mantenimiento, los administradores ferroviarios de la infraestructura se ven obligados a optimizar el presupuesto, mientras que la fiabilidad y la disponibilidad deben aumentarse sin poner en peligro la seguridad del tráfico. El gestor de la infraestructura necesita un enfoque sistemático para garantizar niveles de rendimiento definidos. En el escenario actual, la mayoría de las decisiones de mantenimiento y renovación se basan en la experiencia pasada y en las estimaciones de expertos, mediante una combinación de tareas preventivas y correctivas con una baja implementación de mantenimiento predictivo. Por ello, surge la necesidad de un enfoque del coste de ciclo de vida (LCC) considerando el análisis de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS) que proporcione una manera de optimizar la estrategia de mantenimiento, teniendo en cuenta los requisitos presupuestarios a corto plazo, así como los costos de propiedad en el largo plazo. (1)

Los administradores ferroviarios se esfuerzan cada día por reducir los costos de mantenimiento. Es por ello que el argumento para desarrollar regímenes más fuertes de mantenimiento predictivo a través de la monitorización de múltiples componentes y la utilización de las últimas tecnologías digitales para la gestión de activos es más grande que nunca.

El pasado mes de Enero de 2.017, se celebró en Berlín el tercer congreso anual de Mantenimiento de Vía y Gestión de Activos 2.017, reuniendo a la comunidad global de la ingeniería y gestión de activos de infraestructuras para abordar las prácticas pioneras en mantenimiento predictivo a través de las últimas herramientas de supervisión de condiciones remotas y técnicas de mantenimiento. En este congreso, se plantearon diversas cuestiones relacionadas con el mantenimiento:

- **¿Cómo se puede integrar la tecnología en los dispositivos instalados en campo para reducir los costes relacionados con la mano de obra?**
- **¿Cómo se puede lograr la planificación y la decisión orientada a datos para optimizar los regímenes de mantenimiento y gestionar la degradación del sistema?**
- **¿Qué aspecto tendría la hoja de ruta para la transición de los regímenes de mantenimiento reactivo a los regímenes de mantenimiento proactivo y como se puede mejorar la infraestructura para integrar los sistemas de CBM (Condition Based Monitoring/Maintenance)?**

La creciente y veloz interacción entre los mundos reales y virtuales ha dado lugar a lo que se denomina Internet de las Cosas (IoT: Internet of Things). En la aplicación de estas tecnologías en el mantenimiento de la infraestructura y los sistemas ferroviarios que lo acompañan, IoT en sí misma implica la combinación de conceptos desarrollados en los últimos 20 años tales como Big Data, Cloud Computing, Sistemas Ciberfísicos, Inteligencia Artificial, Web 2.0, entre otros...

IoT es el componente tecnológico fundamental sobre el que sienta sus bases el paradigma de la Industria 4.0. (2)

La inclusión del IoT en el mantenimiento preventivo de infraestructuras y sistemas ferroviarios intentará preservar la función de los equipos mediante la aplicación de estrategias eficientes de mantenimiento, inspección y control de los activos permitiendo optimizar la fiabilidad Operacional (FO) y la Disponibilidad de las líneas ferroviarias maximizando de esta forma la rentabilidad de la explotación. Esto nos implicará un cambio sustancial que nos ofrece una gran oportunidad de transformación y de posición competitiva. Mediante la aplicación de tecnologías inteligentes, se dará forma a la experiencia y conocimiento en labores de conservación y mantenimiento de infraestructuras y sistemas ferroviarios permitiendo así dar un gran paso y un impulso a la utilización de un mantenimiento predictivo. El sistema que aquí se propone permitiría optimizar el mantenimiento de la infraestructura y la superestructura ferroviaria mediante una adecuada gestión de las operaciones basadas en técnicas de inteligencia computacional. Dicho de otra forma, la ejecución del mantenimiento preventivo se realizará cuando lo determine y requiera el nuevo sistema de gestión, dejando en un segundo plano la experiencia pasada y las estimaciones de expertos.

Pero tendremos que tener en cuenta que la tecnología, aunque nos proporciona un avance considerable en muchos aspectos, no lo es todo y estos sistemas por complejos y sofisticados que sean, nunca van a alejar al hombre del trabajo de coordinación entre las personas, lo que permitirá que estos sistemas tecnológicos puedan funcionar con niveles elevados de eficiencia. No se pueden introducir cambios tecnológicos de semejante magnitud sin considerar el proceso de transformación y renovación de la organización, cultura y sistemas de gestión operacional. (3)

La solución que aquí se propone, se trata de una solución innovadora diseñada para pasar del mantenimiento tradicional (basado en el kilometraje), al mantenimiento predictivo (basado en el estado real de los equipos), reduciendo así el coste de ciclo de vida para los administradores ferroviarios.

Esta propuesta se centra en el uso de una red IP, de comunicaciones inalámbricas y del internet de las cosas (IoT) para lograr el mantenimiento predictivo a distancia de las infraestructuras y sistemas ferroviarios. En otras palabras: mejorando el acceso a la información proporcionada por los componentes de la instalación, se podrán prevenir posibles incidencias antes de que ocurran.

Con esta propuesta conseguiremos que la disponibilidad de las instalaciones ferroviarias sea más alta ya que el mantenimiento predictivo, minimizará las averías intrínsecas.

2. Mantenimiento Avanzado de Infraestructuras, Instalaciones y Sistemas Ferroviarios

En este apartado analizamos cada una de las situaciones más relevantes para aplicación de nuevas técnicas de mantenimiento de forma que cada una de ellas, formen parte de la nueva red en el “Core Platform” que se propone.

Infraestructura Ferroviaria.

La infraestructura exige una vigilancia continua para su mantenimiento. La experiencia y tecnología desarrollada con las aportaciones del área de Geotecnia y ERGI, les permite calificar y cuantificar el riesgo geológico de la infraestructura para un posterior estudio detallado. El mantenimiento de terraplenes y trincheras es fundamental ya que pueden provocar la suspensión del tráfico ferroviario. (4)

La Infraestructura ferroviaria española de Alta Velocidad se corresponde con los siguientes datos:

Tabla 1. Infraestructura de Alta Velocidad en Mantenimiento

PARAMETROS	VALORES
Km. de Vía	2.200 km
Túneles	178 (268,51 km)
Viaductos	243 (114,28 km)
Plataforma	1.817,21 km
<i>Fuente: Declaración de Red ADIF 2.017 / Atlas Alta Velocidad Ferroviaria en España - FFE</i>	

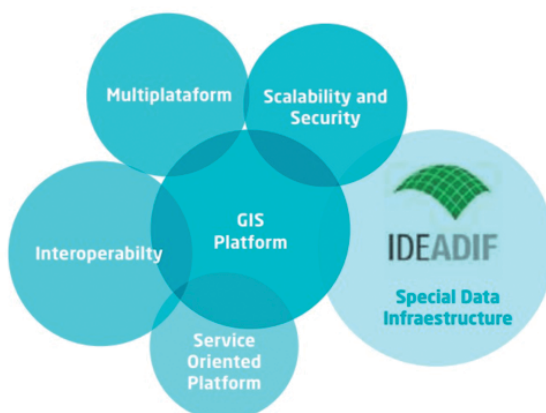
Para analizar el mantenimiento predictivo de la infraestructura ferroviaria, de cara a detectar e identificar con anterioridad riesgos potenciales, existen nuevas tecnologías como la tomografía sísmica, tomografía eléctrica, geo-radar 3D, etc...

Como actuaciones predictivas claves a realizar en la infraestructura ferroviaria, numeramos las siguientes:

- **Realización de campañas de inspección geotécnica en las líneas**, que permiten calificar y cuantificar el riesgo geológico de la infraestructura para su posterior estudio detallado (P. ej. ERGIS de ADIF - Estudios de Riesgos Geológicos de Infraestructura). (4)

Mediante el uso de la tecnología GIS (Geographic Information Systems), y la creación de una Plataforma SDI (Spatial Data Infrastructure), las capacidades de preguntar y visualizar datos geográficos son cada día más fáciles de hallar, y conforme pasa el tiempo, esta tecnología está siendo más barata y accesible para cualquier empresa o recurso que la necesite. Se presenta una plataforma corporativa SDI como solución global que proporciona la estandarización e interoperabilidad, gestionando y publicitando la información geográfica en cualquier organización. Una combinación de hardware, software, datos, metodologías y recursos humanos que operan de una manera coherente para analizar y producir información geoespacial integrada. Este sistema, permite el acceso a informes con información multidisciplinaria sobre los datos recogidos que generan producto y permiten optimizar el tiempo. (5)

Figura 1. Objetivos Principales de la Plataforma SDI de IDEADIF.



Fuente: INDRA

Este tipo de sistemas contribuye a la reducción de costes de desarrollo proporcionando una plataforma que será usada por nuevas unidades que requieran aplicaciones GIS. Su arquitectura, permite la introducción de nuevas funcionalidades y la expansión de información de los datos geográficos almacenados. (5)

- **Inspección y Vigilancia de Trincheras y Terraplenes.** Mediante el uso de tecnologías como la tomografía sísmica o la tomografía eléctrica, se pueden detectar posibles movimientos o fallos en el terreno.

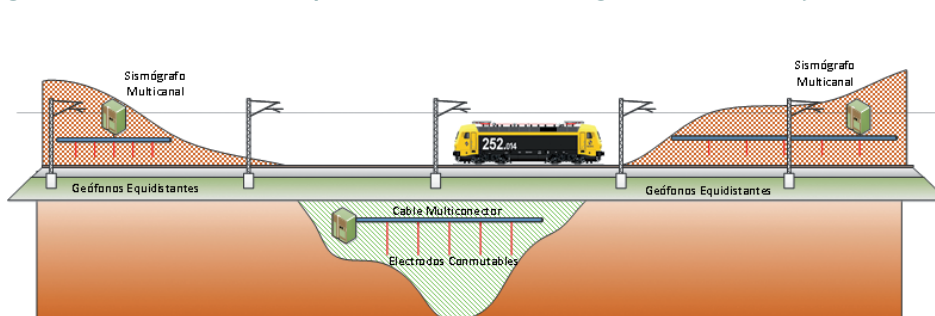
La tomografía sísmica, mediante esta técnica se estudia los cambios de rigidez de los materiales del subsuelo, reconstruyendo una imagen de su estructura interna a partir de los tiempos de trayecto de las ondas sísmicas que se propagan en el interior de una sección de terreno comprendida entre dos sondeos. Se realiza mediante un sismógrafo multicanal y una implantación de geófonos equidistantes de componente vertical sobre el terreno. En la actualidad, la fuente de energía utilizada para la generación de la onda de compresión que se registra en la adquisición de datos es generada mediante una maza golpeando sobre una placa metálica. La incorporación de la placa metálica bajo la vía, aprovecharía la energía generada al paso de cualquier circulación ferroviaria para introducirla en el sondeo de emisión. Esta energía producida se propaga en forma de ondas P a través de las distintas unidades litológicas que componen el subsuelo definiendo un modelo de velocidad sísmica en profundidad. Su uso se estima principalmente para la verificación del estado de taludes y se realizará conforme a norma ASTM D4428. (6)

La tomografía eléctrica, (ERT - Electrical Resistivity Tomography) estos métodos eléctricos son una potente herramienta de modelización bidimensional y tridimensional del subsuelo. Permiten realizar correlaciones geológicas, identificación de fallas, monitorización en el tiempo de plumas de contaminación, niveles freáticos, cuñas salinas, karstificaciones, dolinas y cavidades. (6)

Esta técnica, proporciona conjuntamente información lateral y en profundidad. El sistema consta de un resistivímetro o unidad básica, un selector de electrodos y un juego de cables multiconectores que permiten utilizar hasta 64 electrodos conmutables de forma totalmente automática a través del selector de electrodos y controlado por la unidad básica de control. Se trata de un método de resistividad multielectrónico basado en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas). Todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado permitiéndonos poder realizar un gran número de medidas tanto en profundidad como lateralmente en un breve espacio de tiempo (500 medidas en hora y media) lo que nos hace obtener modelos 2D de gran resolución. Estas técnicas numéricas que se emplean, nos permitirán poder procesar de forma eficaz todo este gran volumen de información. Actualmente se está avanzando en la modelización 3D. (7)

Su uso se estima principalmente para la verificación de terraplenes y trincheras (deslizamientos) mediante la detección de cambios en la estructura somera del subsuelo, y se aplicará conforme a norma ASTM D6431. (7)

Figura 2. Detalle de Implantación de Tomografía Sísmica y Eléctrica.



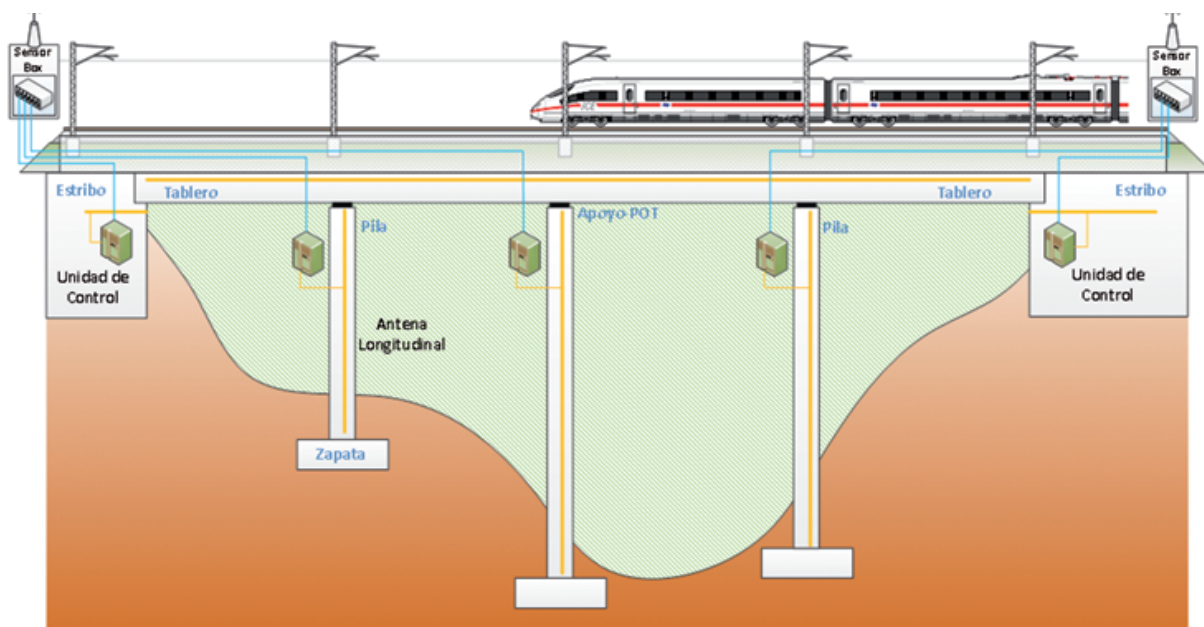
Fuente: Propia

Otra metodología que se podría aplicar es el Sistema FBG, mediante la aplicación de geotextiles instrumentados en su construcción.

- **Auscultación de elementos estructurales (pasos elevados y viaductos)**, que permita determinar las actuaciones a llevar a cabo que pasan desde pequeñas reparaciones, la aplicación de pintura en puentes metálicos, hasta refuerzos o sustituciones por agotamiento de la capacidad portante. Para ello se utilizará tecnología basada en georradar “GPR” (Ground Penetration Radar o Radar de Penetración terrestre), que posibilita la definición precisa de la ubicación y dimensiones de los elementos estructurales, así como información básica para otros estudios pudiendo alcanzar una profundidad de hasta 5 metros.

Se trata de un método no invasivo de análisis de materiales basado en la transmisión de ondas electromagnéticas de banda ultra ancha en los materiales (frecuencias de UHF-VHF entre 20MHz y 2.5GHz). Esta técnica se puede usar para la determinación de fracturas y cimentaciones, estudios no destructivos de estructuras de hormigón, inspección de tableros de puentes, inspección de las paredes de los túneles, inspección de geotextiles así como la localización de huecos en paredes y pantallas de hormigón. El sistema se basa en una antena longitudinal flexible, que ofrece penetraciones únicas y permite adaptarse a la geometría del terreno. Las antenas, se conectarían a una unidad de control para la concentración y procesamiento inicial de datos, para su posterior envío a la red.

Figura 3. Detalle de Implantación Georradar GPR en Viaducto



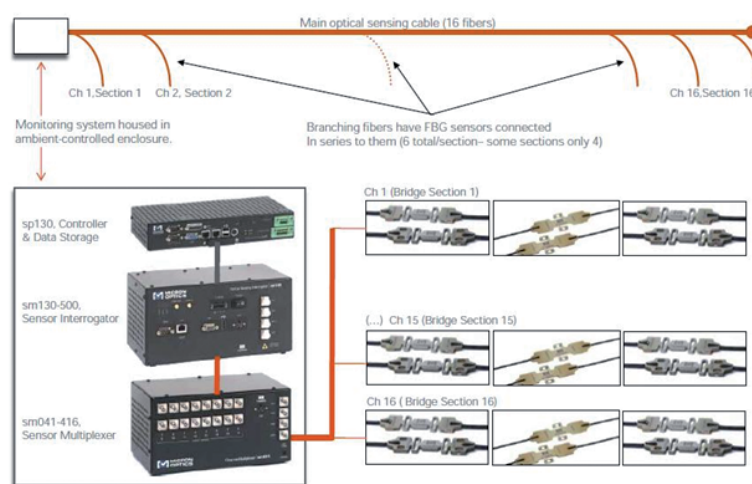
Fuente: Propia

Aparece la técnica de **difracción de Bragg** (Fiber Bragg Grating, FBG) básicamente utilizando sensores individuales de gran precisión y repetitividad para la medida de deformación ($\mu\epsilon$). Actualmente, y fundamentados en esta tecnología, se han desarrollado sensores para la obtención de casi cualquier parámetro físico como presión, aceleración, desplazamiento, humedad... Son varias las ventajas de esta nueva tecnología de medida con fibra óptica; inmunidad electromagnética, larga durabilidad, optimización de canales de medida al poder conectarse decenas sensores (unos 50 máx.) en un único canal de adquisición... (8).

Esta tecnología, se utilizaría principalmente para auscultación de viaductos metálicos. Los sensores se instalan a lo largo y en la totalidad del viaducto metálico. Se disponen sensores de

tensión (strain), temperatura, acelerómetros 3D y medidores de inclinación (tilt). Todos ellos gestionados desde un dispositivo controlador junto con un módulo de adquisición de datos, dispositivo interrogador junto con un switch multiplexor de extensión para las diferentes ramificaciones, y conectados mediante fibra óptica.

Figura 4. System Configuration en el Arsenal Bridge

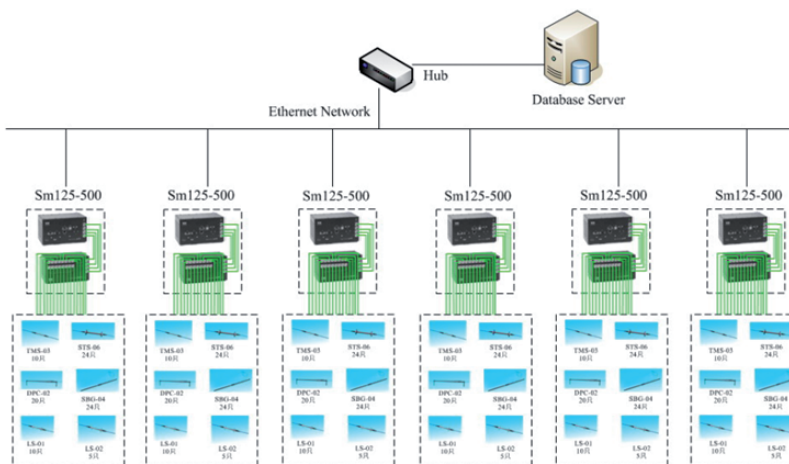


Fuente: Álava Ingenieros

- **Auscultación de túneles.** El mantenimiento predictivo en túneles se basaría en modernos sistemas de geo-diagnóstico con visión artificial, mediciones mediante laser, y técnicas de robótica y automática que nos ayudarían a determinar si varía la posición del túnel. Los túneles ferroviarios precisan tanto más mantenimiento cuanto mayor antigüedad tienen, peores métodos constructivos se han utilizado y sufren mayor nivel de agresión por efectos externos: agua, humos, etc...

El uso de sensores basados en fibra óptica en redes de difracción de Bragg (FBG), se consideran cuasi-distribuidos y pueden medir tanto temperatura como deformación. Mediante este sistema, se podría medir la integridad de la estructura del túnel. Es el caso del túnel subterráneo Nanjing Yangtze en China, donde se monitoriza la integridad de la estructura del túnel mediante FBG. En este caso, los sensores se embebieron en la fabricación de las dovelas, y están conectados entre sí con el sistema como se expone en la siguiente figura. (8)

Figura 5. Sensor Network Configuration en el Nanjing Yangtze River Tunnel



Fuente: Álava Ingenieros.

Todas las mediciones que se recojan a lo largo del túnel, se gestionan en su propio sistema servidor de base de datos, compuesto de varios subsistemas.

Superestructura Ferroviaria. La vía.

La explotación del material rodante viene determinada, entre otros factores, por las características de la superestructura de la vía. La conservación preventiva de las vías férreas es un aspecto clave en la prestación del servicio ferroviario e incide directamente en la calidad de dicho servicio.

La vía sobre balasto exige una vigilancia mayor debido a que es sobre ella sobre la que se transmiten todos los esfuerzos al paso de las circulaciones. El mantenimiento que se realice, será más exhaustivo a mayor nº de circulaciones y toneladas transportadas por la misma. También se está ensayando la aplicación de la Vía en placa mediante bloques, traviesas o conjuntos prefabricados de hormigón con sistemas anti-vibratorios sobre losas de asfalto y hormigón, incluyendo también desvíos sobre traviesas de hormigón. El objetivo es, junto a minimizar ruidos y vibraciones, contar con una vía más duradera y económica en su explotación. Este sistema propiamente dicho, apenas precisará mantenimiento. (4)

Para llevar a cabo parte de estas actividades de mantenimiento y detectar con anterioridad determinados fallos y faltas en la superestructura, se plantean el desarrollo e implantación de nuevas tecnologías para identificación de riesgos potenciales contribuyendo a un óptimo mantenimiento predictivo:

- **Vigilancia de los parámetros geométricos de vía** (nivelación, alineación, ancho de vía, peralte, alabeo, gradiente, curvatura, etc...) verificando además el estado del carril, traviesas y fijaciones. Actualmente, su supervisión se lleva a cabo con coches de auscultación geométrica de vía que determinan su estado.

Se propone una auscultación “dinámica” que se realice a bordo de las propias circulaciones que transitan por la misma, y que la información se envíe directamente al centro de datos correspondiente (cloud computing) para su procesamiento. Se realizará mediante la incorporación de equipos automáticos en coches de pasajeros y locomotoras, registrando, guardando y transmitiendo los datos de forma automática. Por un lado, se trata de un sistema laser de auscultación de geometría de vía a alta velocidad, que permite la auscultación geométrica de vía hasta velocidades de 350 km/h con una frecuencia de muestreo de 0,5 metros, mediante el uso de paquetes inerciales y cámaras digitales de última generación. Por otro, un sistema de auscultación de geometría de vía por contacto bajo carga (Vel. máx. de 40 km/h). (9)

- **Análisis de Aceleraciones Transversales en carril.** Correlacionando los niveles de las aceleraciones transversales (su evolución en el tiempo) con el punto geométrico donde se producen, se pueden diseñar planes de intervención concretos realmente eficaces y que actuarán sólo en aquellos puntos necesarios y cuando realmente se precise. La reposición geométrica de estos parámetros garantiza la seguridad de las circulaciones en condiciones óptimas. (9)

- **Auscultación/Inspección Ultrasónica del Carril**, mediante el uso de las ruedas de los coches/locomotoras como unidades de medición rodante (RSU). Generalmente, se utilizan dos cabezas de medición por carril, lo que permite auscultar a velocidades de hasta 80 km/h con un porcentaje de acierto en defectos sospechosos del 90%. Todos los datos obtenidos en la medición, serían enviados de forma directa al centro de datos correspondiente (cloud computing). En su procesamiento, se podrá detectar de forma temprana defectos internos de carril para mejorar así las labores de mantenimiento. (9)

- **Vigilancia del balasto:** el balasto precisa de una importante vigilancia y movimiento por su paulatino deterioro y por la pérdida de sus características mecánicas y geométricas. La posibilidad de inserción de sensorica específica en el balasto para obtener mediciones sobre sus propiedades geométricas, situaciones atmosféricas, así como el número y tipo de circulaciones

que se producen (velocidad de circulación de los trenes), determinará cuando se deben realizar las operaciones de bateo y/o renovación del mismo. Esta sensórica, deberá colocarse de forma que no interfiera ni se vea condicionada/deteriorada en las operaciones de bateo o nivelación.

La aplicación del **sistema DAS (Distributed Acoustic Sensing)**, mediante disposición de una línea de Fibra Óptica por la cara inferior del lecho de balasto, determinará el deterioro del mismo mediante comparaciones de señales acústicas que se transportan por los cables de Fibra Óptica y que se producen tras el paso de determinadas circulaciones. La combinación con sistemas de detección y sensores de ruedas, garantizan la fiabilidad del sistema. (10)

- **Vigilancia/Rotura del Carril:** Los raíles, están sometidos a grandes tensiones de forma permanente, debidas al propio tráfico ferroviario, variaciones térmicas que pueden incidir a largo plazo produciendo diferentes tipos de daños. Mediante la monitorización continua, se permite medir fuerzas, tensiones mecánicas y aceleraciones que determinarán los desplazamientos laterales y longitudinales de la vía así como el desplazamiento lateral de las traviesas. Con toda esta información, extraemos la medición de cargas sobre la vía al paso de las circulaciones. (11)

La rotura de carril, es uno de los puntos más críticos que se presentan. Su detección temprana es fundamental en una buena explotación de una línea ferroviaria. Se presentan como tecnologías más prometedoras la basada en ultrasonidos, y en fibra óptica. La tecnología de ultrasonido presenta una buena respuesta ante la rotura del carril, incluso detecta los alabeos sin necesidad de sensores adicionales, sin embargo es necesaria la instalación de transductores cada 3 km y equipo electrónico cada 1,5 km. La tecnología de fibra óptica ofrece resultados parecidos a la de ultrasonidos, aunque su sensibilidad es aún mayor. Esta sensibilidad le permite detectar pequeñas grietas en el carril, así como la temperatura del carril de cara a controlar las dilataciones/contracciones térmicas producidas por variaciones bruscas de temperatura, por lo que es capaz de predecir, en cierta medida, la rotura del carril. Por otro lado, hay que considerar que su adhesión al carril es complicada y su mantenimiento, en caso de rotura del carril, costoso.

Aparece la **técnica de Brillouin o SBS (Simulated Brillouin Scattering)**, basada en la estimulación de Brillouin mediante la implantación de sensores de fibra óptica distribuido (tramos longitudinales de F.O.). Utiliza la reflexión de la luz para realizar la medida. Con este sistema, se pretende detectar roturas y grietas en la vía del tren, pudiendo detectar la presencia de trenes en ella y la discriminación de distintos tipos de trenes, todo ello mediante sensado óptico basado en tecnología Brillouin, concretamente BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) con amplificación Raman. El sistema proporciona la localización precisa de la deformación o incremento de temperatura sobre distancias de hasta 50 km con una resolución mejor de 1 metro. (8)

Figura 6. Sensores de Deformación y temperatura instalados en raíles de línea en operación.



Fuente: e-medida. Revista Española de Metrología

- **Aparatos de Vía.** El análisis puntual y el registro de todos y cada uno de sus movimientos, verificando y analizando los tiempos de respuesta de sus diferentes elementos (accionamientos, espadines, etc...) determinará el estado y evolución del aparato de vía. Para ello, se dispondrá de un equipo propio de control a colocar por cada aparato de vía, que mediante conexión o interface con todos los elementos del aparato (accionamientos, cerrojos, corazones, agujas, sensores, etc...) a través de los controladores de objetos de los enclavamientos, monitorizará de forma constante todas las reacciones de estos, transmitiendo dicha información para su procesado.

De esta forma, se podrán detectar de forma temprana (predictiva) posibles fallos o incidencias que se puedan producir en el correcto funcionamiento del aparato de vía, así como indicar cuando se deben realizar las diferentes tareas de mantenimiento (ajustes y lubricación donde se requiera).

- **Vía en Placa.** Se trata de vigilar y controlar el asentamiento diferencial de la estructura (losa de hormigón) así como su posible deformación, hechos que serían los principales causantes de fallos graves. La aplicación de inclinómetros de alta precisión con una alta estabilidad térmica y mecánica, junto con la aplicación de galgas extensiométricas o extensómetros específicos que trabajarían integrados en el hormigón o entre la losa y la pre-losa, proporcionarán un control exacto de los posibles asentamientos diferenciales y deformaciones que se pudieran producir en la plataforma de hormigón que sustenta los carriles con sus accesorios.

Figura 7. Detalle de Vía en Placa



Fuente: Rheda 2.000

- **Sistemas de Detección de Arena.** El proyecto de investigación ARID-LAP está enfocado a la minimización de los efectos originados por climatologías extremas sobre la infraestructura ferroviaria de altas prestaciones localizada en zonas áridas con un gran número de líneas de estudio. Para este tipo de detección, se propone el uso de sensores de fibra óptica basados en **redes de difracción de Bragg (FBG)**, que se disponen cuasi-distribuidos (de manera no uniforme ajustándolos en las zonas más problemáticas) y pueden medir tanto temperatura como deformación.

Por un lado, la medida de cambios de temperatura por parte del sensor de temperatura se asocia y correlaciona a la detección del fenómeno de arena acumulada porque se entiende que cuando la arena cubra al sensor de temperatura se va a apreciar un cambio significativo en la dinámica de la medida de temperatura. Por otro lado, la medida de deformaciones del sensor de deformación se asocia y correlaciona a la detección de arena eólica porque se entiende que cuando la arena golpee al sensor de deformación se van a observar cambios rápidos y constantes en la lectura del sensor de deformación.

Los sensores se colocan en línea y todos ellos se conectan a un dispositivo interrogador o registrador que registran unos mapas de valores de temperatura y deformación. La conexión entre estos y estos con el interrogador, se realiza mediante F.O. La detección de la arena acumulada se produce por variaciones de temperatura respecto al tiempo en los sensores de temperatura. Comparando las medidas de los sensores adyacentes, detectamos en qué punto se está acumulando la arena. Para la detección de las arenas en suspensión, se comprueba la lectura de los sensores de deformación, variando su lectura al ser golpeados por la arena en suspensión. (8)

Línea Aérea de Contacto.

La catenaria es el elemento ferroviario que más requiere de un buen mantenimiento, por ser el principal foco de los problemas que se dan en la explotación. Para llevar a cabo parte de estas actividades de mantenimiento y detectar con anterioridad determinados fallos y faltas en las instalaciones de catenaria, se plantean el desarrollo e implantación de nuevas tecnologías para identificación de riesgos potenciales contribuyendo a un óptimo mantenimiento predictivo:

- **Vigilancia de la Sección y estado del Hilo de Contacto.** A modo predictivo, se pretende detectar fallos en el hilo de contacto mediante dispositivos de termografía y visión artificial que se incorporarían tanto en los vehículos auscultadores, como en los propios vehículos que circulan por la línea en explotación. La termografía sólo sería válida en plena carga del cable, situación que se conseguiría mediante la realización de la misma con equipos embarcados en las propias circulaciones. Este sistema analizaría su desgaste.

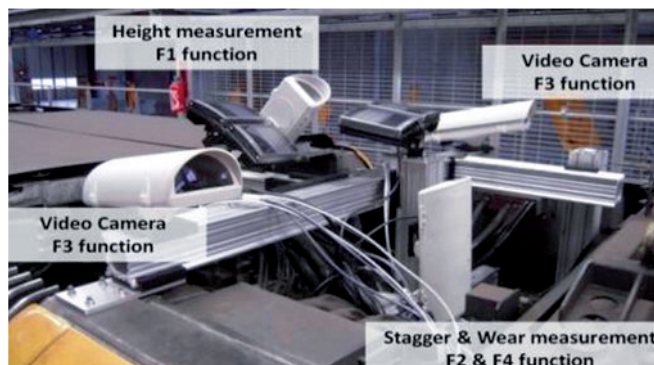
Con objeto de analizar el desgaste del hilo conductor y por consiguiente el de los frotadores o mesillas de los pantógrafos, mediante la aplicación de sistemas de visión artificial se podrá determinar el estado del hilo de contacto para aplicar cuando proceda, los sistemas de lubricación correspondientes. Otra técnica a emplear, sería la incorporación del sistema FBG mediante la incorporación de sensores de F.O. en el hilo de contacto.

- **Características geométricas (altura y descentramiento).** Actualmente, su supervisión se lleva a cabo con coches de auscultación geométrica de vía que determinan su estado. Se propone que esta auscultación también sea realizada a bordo de las propias circulaciones que transitan por la misma, y que la información sea enviada directamente al centro de control correspondiente para su procesamiento. Este procedimiento, detectaría la flecha y contraflecha del cable así como posibles obstáculos dentro de la envolvente de seguridad entre otros. Iteración pantógrafo-catenaria.

Mediante un servicio de monitorización basado en cámaras laser, infrarrojas y de vídeo que se instalan a bordo de los trenes en circulación, se permite la obtención de imágenes para su posterior análisis y procesamiento. (12)

Estas imágenes, son procesadas y transmitidas de forma automática e inalámbrica al centro de datos para su procesamiento para realizar un rápido análisis de los datos y una evaluación de la salud de la infraestructura.

Figura 8. Dispositivo de Monitorización de Catenaria.



Fuente: Alstom

- **Compensación mecánica de Catenaria.** Se propone la incorporación de sensórica específica como galgas extensiométricas que permitan la medición de la tensión mecánica de catenaria para determinar que la misma se encuentra dentro de los parámetros determinados. Con esta medición, obtenemos información que enviaremos al centro de datos correspondiente (cloud computing) y nos permitirán valorar si el comportamiento de la catenaria es el adecuado en función del nº de circulaciones, temperatura ambiente, climatología, etc...

Por otro lado, la incorporación de elementos de medición de carga para verificar la posición de los cilindros del contrapeso y que estos fluyen correctamente, sensores de temperatura, etc... completará el sistema de control y supervisión de la compensación mecánica de catenaria.

- **Componentes mecánicos de la catenaria** (postes, pórticos, sustentador, péndolas y aisladores). De igual forma que en el caso anterior, mediante un servicio de monitorización basado en cámaras laser, infrarrojas y de vídeo que se instalan a bordo de los trenes en circulación, se permite la obtención de imágenes que nos ayudarán a la verificación del estado de los diferentes elementos mecánicos que componen el sistema de la línea aérea de contacto.

Actualmente, ADIF está trabajando en la implantación de un nuevo proceso de mantenimiento de catenaria. El nuevo proceso, eliminará el mantenimiento cíclico y sistemático de la línea aérea y se sustituye por el mantenimiento según estado apoyado en las inspecciones visuales y termográficas, auscultación geométrica y análisis de fiabilidad. Esto iría alineado con la propuesta de mantenimiento predictivo que se realiza.

Subestaciones Eléctricas de Tracción.

Las subestaciones más modernas, apenas precisan mantenimiento, ya que entre otras cosas, prácticamente la totalidad de los equipos se encuentran todos telemandados y tele controlados (mediante dispositivos IED's - Intelligent Electronic Devices). Existen muchas técnicas aplicables a las subestaciones eléctricas: termografía infrarroja, ultrasonidos, análisis de vibraciones, análisis de aceites, análisis espectral de intensidades de corrientes, etc... son algunas de ellas. Aun así, la técnica de termografía infrarroja se puede utilizar para examinar los componentes y equipos que componen la subestación y junto con la técnica de ultrasonidos, consideramos que son las más apropiadas.

La termografía infrarroja, se trata de una técnica de medición no intrusiva que mediante el uso e instalación de dispositivos termográficos de infrarrojos, obtenemos la temperatura en las superficies de los cuerpos (imágenes cuantificadas de temperaturas denominadas termogramas).

El sistema de ultrasonidos, se usa para la detección de fugas en sistemas de aire o gas comprimido, funcionamiento de válvulas, descargas corona en equipos eléctricos, arco eléctrico, etc... Las descargas eléctricas, tales como la formación de arcos, o de efecto corona (en voltajes más altos), tienen el potencial de crear una falla del equipo y con un tiempo de inactividad elevado. Además, los problema de RFI (Interferencia de Radiofrecuencia) y EMI (Interferencia Electromagnética) impactan en nuestras redes valiosas de comunicación.

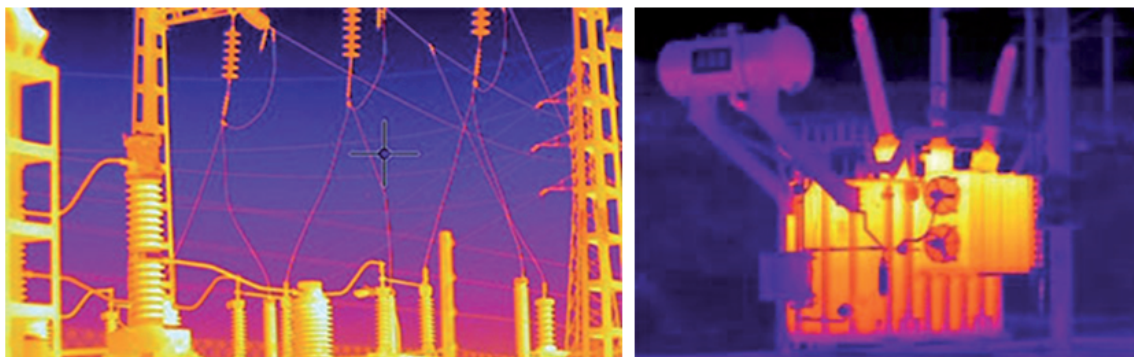
Mediante la instalación de dispositivos de termografía y de ultrasonidos fijos que envíen información relativa de los elementos que componen la subestación, junto con la información obtenida vía los dispositivos de control que hacen posible el telemando y telecontrol de dichos elementos, se optimizarían las intervenciones y manipulaciones innecesarias. A todo esto, podemos añadir algún dispositivo de control adicional como:

Transformadores: Además de una medición de corrientes y tensiones en la entrada y salida del mismo, la medición y análisis de los aceites dieléctricos del transformador, mediante sensórica específica, permitiría evaluar el color y sedimentación de muestras, verificar su rigidez dieléctrica, o analizar su acidez para que se garantice el correcto funcionamiento del transformador.

Interruptores: aprovechando los sistemas de telemando y telecontrol (equipos IED's), realizar ensayos de disparos programados y obtener medidas adicionales del comportamiento de los mismos.

Calidad de la Energía: la medición del control de armónicos y la determinación de la procedencia de las perturbaciones eléctricas, es decir, si éstas llegan desde la distribuidora eléctrica o son causados por los equipos electrónicos de las instalaciones ferroviarias.

Figura 9. Técnica de Termografía Infrarroja.



Fuente: Emb.

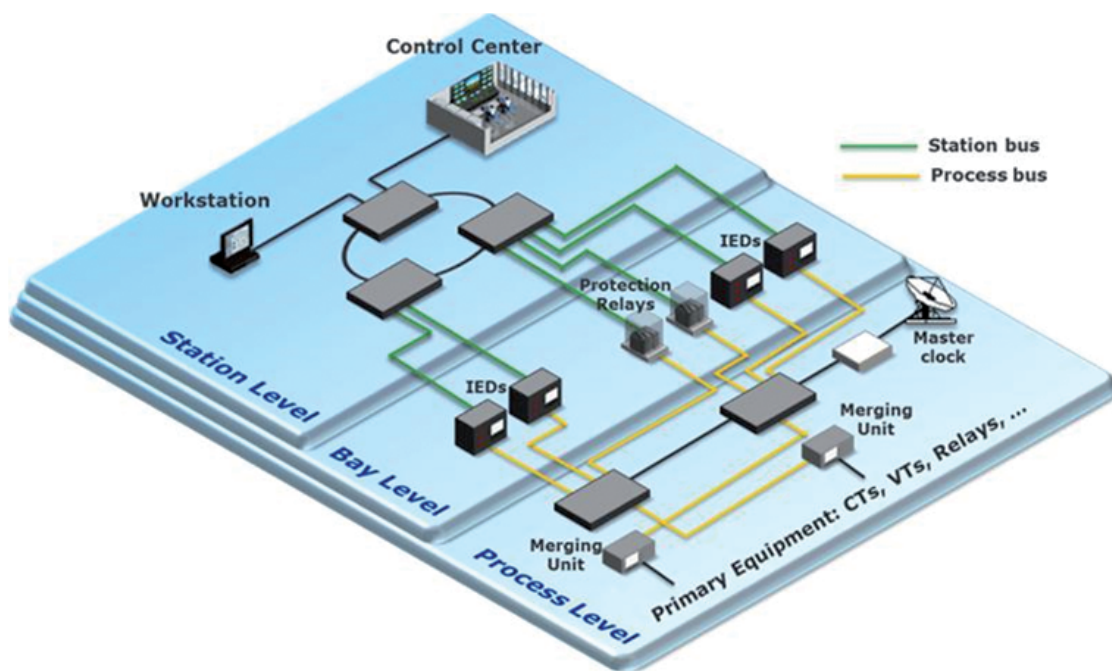
Todos estos dispositivos, se denominan IED's o lo que es lo mismo dispositivos electrónicos inteligentes. Disponen de funciones de protección, control, supervisión, medición y comunicación principalmente. IED's típicos serían los computadores de subestación (HMI), RTU's (Remote

terminal Units), gateways, monitorización, relés de protección, unidades de control de bahía, contadores, transformadores de instrumentación digitales, MU's (Merging Units), entre otros.

Internamente en la subestación se utiliza una red Ethernet con norma IEC-61850 (norma de subestaciones para comunicación y normalización de los equipos) donde se encuentran conectados todos los dispositivos de control y protección que componen la subestación. Se aprovechará esta red para la conexión de los diferentes elementos de termografía infrarroja y ultrasonidos instalados por la subestación. Gracias a esta red, se podrá realizar un diagnóstico previo de todos los equipos, centralizar toda la información en los equipos de gestión y control de la propia subestación y proceder al envío de datos al sistema general de control, para su análisis y toma de decisiones.

La subestación puede dividirse en tres niveles funcionales distintos: nivel de subestación, nivel de bahía y nivel de proceso. El nivel de proceso es aquel en el que se sitúan los equipos primarios, tales como sensores, transformadores de corriente, transformadores de tensión, interruptores y seccionadores. En el nivel de bahía se ubican los equipos de protección, control y monitorización (IED's). El nivel de subestación es aquel donde se sitúan las unidades centrales de subestación que se conectan con los centros de control. (13)

Figura 10. Arquitectura General de una Subestación.



Fuente: SmartGridsInfo.

En este punto, la interoperabilidad se consigue mediante la identificación de las funciones comunes dentro de una subestación y su estandarización a través de un modelo jerárquico de datos. En él, un dispositivo físico contiene uno o más dispositivos lógicos, que a su vez contienen uno o más nodos lógicos agrupados según su funcionalidad y propósito dentro de cada dispositivo lógico. Cada uno de estos nodos lógicos está definido de manera estandarizada mediante objetos de datos con sus correspondientes atributos. (13)

Sistemas de Señalización y Protección del Tren. Instalaciones de Seguridad.

Los sistemas electrónicos de control generan más del 20% de las incidencias e indisponibilidad de la infraestructura ferroviaria. Dispondrán de soluciones de servicio de control ferroviario desde escritorios de ayuda y asistencia técnica hasta gestión de activos, configuración y obsolescencia, que mantienen en funcionamiento los sistemas ferroviarios. Son los denominados SAM (Sistemas de Ayuda al Mantenimiento) cuyo propósito será facilitar las tareas de mantenimiento preventivo, predictivo y sobre todo correctivo.

SAM, permite el acceso a información de diagnosis así como a las funciones propias de mantenimiento sobre los sistemas de señalización y control de tráfico (ERTMS, LZB, etc...), permitiendo a los operadores la capacidad de identificar problemas ocultos y prevenir fallas e interrupciones del servicio. El sistema proporcionará mayor capacidad yendo más allá de la monitorización y configuración del sistema en tiempo real, disponiendo de algoritmos propios que se anticipen a los fallos y permitan acciones de mantenimiento preventivo con el consiguiente ahorro que esto genera.

Como es bien sabido, el enclavamiento electrónico es el corazón del sistema de señalización y es el responsable de establecer los itinerarios de los trenes y garantizar la seguridad de la circulación. Para ello, el enclavamiento acciona los aparatos de vía (principalmente desvíos) y las señales, de forma que se establezca el itinerario definido e impedir cualquier otro movimiento incompatible.

- **PLO:** En el Puesto Local de Operación, se encuentran el enclavamiento (ENCE) y el sistema de protección (Control y gestión de tráfico) como el ERTMS. En este emplazamiento, se dispone de un Sistema de Ayuda al Mantenimiento (SAM) que aplica a los sistemas anteriores. La información recogida, se enviará al centro de datos correspondiente (cloud computing) para su análisis y tratamiento. Por otro lado, se remite la información correspondiente al centro de mantenimiento para registrar el estado de los elementos que se supervisan.

Para los enclavamientos electrónicos (ENCE), se monitorizan de forma local los eventos que se producen para su registro y posterior análisis (predictivo). El enclavamiento recibirá información de diagnosis desde los diferentes subsistemas que tenga conectados (concentradores y controladores de objetos). Esta información se remite desde ENCE al puesto de control de Interfaces, siendo estos los encargados de almacenar la información a nivel local de forma permanente. Las interfaces entre todos ellos se realizan utilizando la red de datos privada de señalización (red de datos L3 redundante, que facilita conectividad Ethernet para servicios no específicos).

De igual forma, para los sistemas de protección ATP (control y gestión de tráfico), se dispondrá un sistema SAM por cada ENCE que contiene aplicaciones destinadas a facilitar el acceso, análisis y control de la información de diagnosis generada por el propio sistema. En ERTMS-N1, SAM permitiría conocer el estado actual de los CLC's (Centralizador de LEU's), los propios LEU's y su conexión con las balizas y los lazos correspondientes, mientras que para ERTMS-N2, permitirá conocer y analizar la información procedente del estado actual de todo lo anterior y las RBC's.

- **CV:** Los circuitos de vía, generalmente de audiofrecuencia, dispondrán de sistema de control para los transformadores y cajas de sintonía que los componen, junto con su sistema central. Se realizará un análisis continuo de las tensiones y frecuencias que se registran tanto en modo de reposo (sin vehículo que detectar) como en modo de activación así como de los posibles cortocircuitos que pudieran producirse y/o afecciones por las circulaciones de corrientes de retorno. Por otro lado, la captura de información relacionada con el nº de circulaciones que pasan por el CV así como la meteorología asociada del momento, complementan la información obtenida para la gestión de su mantenimiento. Toda esta información se recogerá desde el controlador de objetos conectado al ENCE correspondiente,

transmitiéndose hasta el mismo y desde él, hacia los puestos de control de Interfaces.

- **Sensores de Rueda o Contadores de Ejes (Fail-Safe):** hacen uso del flujo magnético existente entre las dos bobinas montadas a ambos lados del rail para determinar el paso de las ruedas. Sistemas de control asociado a estos equipos como el instalado en los circuitos de vía permitirán conocer su estado y comportamiento al momento.

Sistemas Auxiliares de Detección.

Para que la circulación de trenes se realice con total garantía y seguridad, se requiere de complejos y precisos sistemas de detección que alerten de incidencias en tiempo real. A lo largo de la red ferroviaria, existen elementos auxiliares de detección entre los que figuran los DCC's (detectores de Cajas calientes), DVL's, (detectores de viento lateral), DCO's, (detectores de caídas de objetos), etc... Recordamos que todos estos elementos, cuentan con su propia red de datos de detectores, que concentra en los enclavamientos (ENCE) toda la información procedente de dichos sensores de la vía.

- **DCC's - Detectores de Cajas Calientes:** dispositivos de detección de cajas de grasa caliente, frenos agarrotados, temperatura elevada en discos y zapatas, basados en sensores infrarrojos que apuntan sobre los bogies. (14)
- **DVL's - Detectores de Viento Lateral:** (patentado por ADIF), instalados en puntos estratégicos de la línea para controlar la dirección y velocidad del viento.
- **DCO's - Detectores de Caída de Objetos:** (patentado por ADIF), instalados para detectar las posibles caídas de objetos a la vía en pasos superiores y bocas de túnel.
- **DIT - Detectores de Incendio en Túnel:** instalados en túneles de grandes longitudes para controlar la temperatura de cada punto del túnel, detección de focos de calor e incendios, y detección de gases (concentración elevada de CO, NOx, etc...)
- **DOA - Detector de Objetos Arrastrados:** instalados en puntos estratégicos de la vía para detectar que las circulaciones no lleven ningún elemento colgando que pueda afectar a la infraestructura (golpeo de traviesas, etc...)
- **DCDP - Detector Comportamiento dinámico para Pantógrafo:** conjunto de sensores que controlan la iteración pantógrafo-catenaria al paso de un tren, detectando la elevación del hilo de contacto que puedan generar daños irreversibles en la catenaria. (14)

Para todos y cada uno de ellos, dada la importancia de su correcto funcionamiento y el impacto que este tiene en la explotación de la línea, se plantea la incorporación de sistemas de apoyo a la supervisión y control que estos dispositivos realizan de forma que nos ayuden a predecir un incorrecto funcionamiento de los mismos.

Por ejemplo, para los dispositivos DCC's, la supervisión de los valores obtenidos en la medición de temperaturas por los 4 sensores y la comprobación de la alineación de dichos resultados, nos podría determinar el grado de funcionamiento del dispositivo. Para los DCO's, la comprobación del correcto estado de la fibra óptica y su posible deterioro, así como la medición del incremento diferencial del sobre-esfuerzo que soporta la barrera física que lo compone, determinarán el momento de actuación sobre el dispositivo.

Telecomunicaciones Fijas y Móviles.

El mantenimiento de las comunicaciones Fijas, consiste en establecer las operaciones y actividades que permitan asegurar la disponibilidad y calidad (niveles de prestaciones y seguridad) del servicio exigido por el operador en las Instalaciones de Telecomunicaciones Fijas y Telecomunicaciones Móviles GSM-R.

El mantenimiento predictivo está basado en la monitorización del funcionamiento y/o

los parámetros de los elementos y las acciones subsiguientes y que es ejecutado siguiendo una previsión consecuencia de los análisis y evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento, estando subordinado a la evolución de unos parámetros de degradación de los sistemas. (15)

Existe un sistema de gestión integrada de la Red de Telecomunicaciones (SGIT) que proporciona una plataforma de gestión para estos sistemas. Las diferentes redes que integran las telecomunicaciones fijas, ya incluyen sistemas de gestión independientes que se aprovecharían para implementar nuevas funcionalidades que aporten al mantenimiento predictivo. Para las telecomunicaciones móviles (GSM-R), sus gestores también aportan información que se integra en el sistema anterior (SGIT).

- **Fibra Óptica:** la detección del aumento de pérdida en la fibra junto con su deterioro y la penetración de agua, son los aspectos fundamentales a detectar en las instalaciones de F.O. de forma preventiva. La condición de la red de fibra óptica se supervisa de forma continua utilizando una o más fibras activas o una o más fibras libres de forma periódica. El objeto es la detección temprana del aumento de pérdida de la fibra que puede ser causado por microflexión, macroflexión o absorción de hidrógeno. (16) En algunas LAV's, ya se realizan medidas de potencia sobre una fibra de cada cable, o medidas reflectométricas sobre otra fibra de cada cable con una monitorización continua, enviando esta información a unidades remotas de Test (URT's) ubicadas en Edificios Técnicos y Subestaciones.
- **Equipos de Transporte SDH/PDH, MPLS e IP:** mediante diseño de un protocolo de pruebas y medidas que se realizarán en un periodo determinado. Mediante estos protocolos, se almacenan los resultados obtenidos para comparar entre ellos las posibles variaciones y poder así determinar las acciones preventivas a considerar. Por otro lado, mediciones y control de parámetros relacionados con la sala del edificio técnico donde se albergan (humedad relativa, temperatura, tensiones de alimentación eléctrica, etc...) nos ayudan a predecir el ciclo de vida de estos equipos.
- **RBC's:** análisis mediante SAM, relacionado con los sistemas de señalización y protección del tren.
- **BTS (Base Transceiver Station):** se realizará un autochequeo del equipo y medidas de ROE (Relación de Onda Estacionaria), ya que un valor alto de este parámetro indica una avería en el sistema. Esta medida nos da la relación entre la potencia de emisión y la potencia que se refleja en la misma hacia el emisor (efecto de onda estacionaria). (15)
- **Equipos "Core" MSC-GSM-R:** para estos equipos, relacionados con el sistema de comunicaciones móviles GSM-R, se establece la supervisión y control de una serie de parámetros (tiempo de establecimiento de conexión, TIR Tasa de Interferencia, Retardo extremo a extremo, etc...) que determinarán sus niveles de funcionamiento. (15)

Equipos electromecánicos en estaciones. Estaciones Inteligentes.

La nueva estación ferroviaria, será una nueva estación sensorizada y monitorizada desde el centro de operaciones y mantenimiento. Todos los elementos que forman parte de ella, estarán interconectados permitiendo una anticipación de respuesta en todos los aspectos de su gestión, y por supuesto, en los equipos electromecánicos que son participantes de ella (escaleras mecánicas, ascensores y pasillos rodantes de tecnología nueva y actual) de cara a su mantenimiento predictivo.

Los principios básicos de las nuevas estaciones están basados en los datos (mediante soluciones IoT y modelos de Business Analytics), infraestructura de comunicaciones, con soluciones basadas

en estándares de ciudades inteligentes. En España, ADIF ya ha puesto en marcha un plan de transformación digital para estaciones de viajeros vinculado a un nuevo plan tecnológico a 5 años en el que se trabaja para definir y normalizar la relación entre la ciudad inteligente y la estación inteligente (propuesta de norma UNE 178109 - Ciudades Inteligentes. Requisitos para la aplicación de la norma UNE 178104 en estaciones inteligentes). (17)

El mantenimiento de determinados equipos electromecánicos, se encuentra muy normalizado mediante la UNE-EN 13015:2002+A1:2008, “Mantenimiento de ascensores y escaleras mecánicas. Reglas para instrucciones de mantenimiento”. Los equipos de elevación, incorporan sistemas de mantenimiento predictivo, a tiempo real, reduciéndose el tiempo de inactividad de los equipos hasta en un 50%. En su funcionamiento, el aprendizaje de las máquinas, reconoce que una vibración determinada está estrechamente relacionada con un fallo inminente de una polea por lo que a partir de este momento, los técnicos de servicio quedan informados para poder abordar la situación (aún no es problema) mientras el ascensor no esté en uso. Estos sistemas, además de a la red del propio fabricante o mantenedor, quedarían conectados a la propia red del gestor de la infraestructura donde se registraría toda la información proveniente de estos equipos para su posterior tratamiento.

Los dispositivos expendedores de billetes son elementos fundamentales en las estaciones que juegan un papel determinante en relación con el usuario. Adicional a la venta de billetes, realizan otra serie de trabajos y requieren de una disponibilidad máxima. A las mismas se les incorporará un sistema de análisis y diagnosis que determine y anticipe los posibles fallos, y permita su conexión con la red de servicios de la estación.

Los sistemas de abastecimiento y generación de energía que disponen las estaciones son otros de los elementos a supervisar y controlar, de forma análoga a lo planteado para las subestaciones de tracción.

En un futuro aparecerán en las estaciones nuevos sistemas revolucionarios de transporte horizontal (pasillos rodantes de altas prestaciones), que ofrecen soluciones eficientes ante los desafíos de la urbanización. En las estaciones con un gran tránsito de personas, modera las aglomeraciones al facilitar el acceso acogiendo hasta un 30 % más de pasajeros. De igual forma que a los equipos de elevación, se les instalará un sistema de mantenimiento predictivo que minimice los tiempos de inactividad de estos dispositivos de transporte que cobran vital importancia en las estaciones ferroviarias.

Figura 11. Escaleras mecánicas, ascensores y rampas en la terminal de llegadas de Madrid Puerta de Atocha.



Fuente: Adif.

Vida útil y costes generales de Mantenimiento.

Para la red de Alta Velocidad en España, en la actualidad, el coste medio de mantenimiento asciende a alrededor de 100.000 €/año por kilómetro, lo que supone un gasto global aproximado de 260 M€ anuales. (2.600 km aprox. de LAV en servicio).

Adif ha logrado reducir durante los últimos cuatro años un 14,4% el coste por kilómetro del mantenimiento de las líneas de alta velocidad, ya que ha pasado de 106.450 euros de 2.011 a 91.120 euros en la actualidad. Según datos facilitados por el gestor ferroviario, el coste de conservación de las líneas AVE es un 70,8% más alto que el de las líneas convencionales, que actualmente es de 52.730 euros anuales por kilómetro. (18)

Además, hay que tener en cuenta que cada elemento que compone la infraestructura posee una vida útil determinada, que oscila entre los 25 años de los drenajes de la plataforma, las instalaciones de señalización, seguridad y comunicaciones, y los 100 años de las obras de fábrica, túneles y puentes. Dentro de los gastos que genera el mantenimiento de cada elemento, el capítulo de la infraestructura y la vía suele ser el más costoso, seguido por el de la señalización y las telecomunicaciones. (19)

VIDA UTIL ELEMENTOS INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA	
PLATAFORMA	AÑOS
Movimientos de Tierras	100
Obras de Fábrica	100
Túneles y Puentes	100
Drenajes	25
Cerramientos	50
SUPERESTRUCTURA DE VIA	30-60
INSTALACIONES ELÉCTRICAS	
Línea aérea de Contacto	20
Elementos de Soporte de la Catenaria	60
Subestaciones Eléctricas	60
Instalaciones de Señalización, Seguridad y Comunicaciones	25
EDIFICIOS Y OTRAS CONSTRUCCIONES	50

Fuente: Revista Líneas-Adif.

Estudio Económico Preliminar. Viabilidad del Proyecto.

En este estudio económico, se ha considerado un periodo de vida útil para este sistema de 75 años, considerando que la red actual de Alta Velocidad ya dispone de 25 años en algunas de sus líneas, y que el ciclo de vida de este tipo de líneas lo estimamos en 100 años. En la actualidad, la red ferroviaria española dispone de 2.534 km de vía de Alta Velocidad (Declaración de Red 2017 - ADIF AV). La actuación se realizaría en el 100% de las líneas de Alta Velocidad que disponen de un coste de mantenimiento €•km/año muy elevado, del entorno de los 90K€•km/año.

Para la realización de este cálculo, se han considerado diferentes parámetros de costes y crecimientos anuales. Se establece el IPC en una media del 1,2% anual.

Como costes de desarrollo e implantación del proyecto, se calcula un precio medio de 0,77M€/km, considerando que la capa de comunicaciones sobre la que se apoya el proyecto (internet) sólo requerirá determinadas actuaciones de intervención y adecuación en los equipos. Esta inversión se realizará anualmente durante los primeros 12 años, plazo estimado en la realización de implantación de este sistema en la red, a razón de 250 km/año. A medida que anualmente se van añadiendo tramos, se va considerando el impacto positivo de ahorro en las labores de mantenimiento actual.

Como “nuevos costes fijos” a considerar anualmente, tendremos el coste y mantenimiento del sistema “Cloud” (la nube) con un impacto mínimo (despreciable) frente al coste de mantenimiento €km/año. Consideramos que el ciclo de vida de esta nueva tecnología será de 15 años y que precisará renovaciones y actualizaciones parciales a medida que avance el desarrollo de la misma tanto para los sensores como para los equipos de interface y comunicación. Estimamos un coste de renovación de 0,15M€/km, que se aplicará transcurridos los 15 años a razón de 500 km/año aproximadamente (durante plazos de 5 años).

En el análisis de comparativa, para el cálculo de los costes SIN mantenimiento predictivo se ha considerado únicamente los costes asociados al mantenimiento a día de hoy (90 K€/km) con sus regularizaciones anuales en función del IPC anual previsto (el mismo en ambos casos).

La reducción del coste de mantenimiento con la aplicación de este nuevo sistema (incluyendo la eliminación de muchas averías, reducción de inactividad, etc...), se estima en torno a un 35% aproximadamente sobre los costes actuales. En la siguiente tabla, se detalla a alto nivel los futuros costes a incurrir anualmente en ambos escenarios. La gráfica final de la misma, nos determina que esta propuesta podría ser rentable a partir del año 25 de su puesta en marcha, disponiendo todavía de 50 años más para obtener una mayor rentabilidad y por consiguiente un mayor ahorro de los costes asociados al mantenimiento, con un ahorro total estimado durante el ciclo de vida de las instalaciones de 5.920M€.

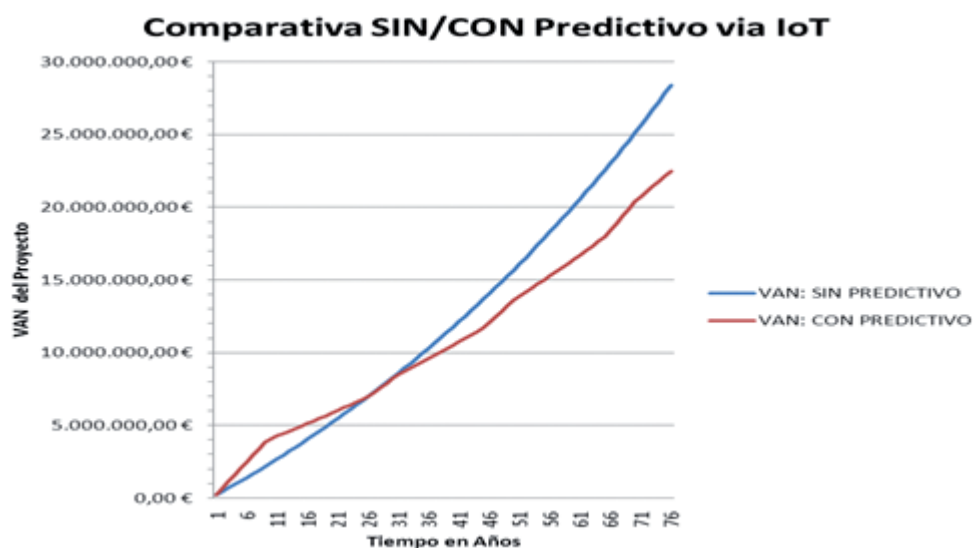
Por otro lado, habría que tener en cuenta que este “nuevo sistema de mantenimiento”, incrementaría el ciclo de vida útil de la infraestructura entorno a un 20/25%.

Tabla 3. VAN. Estudio económico del Proyecto.

Año	Costes Sin Mantenimiento Predictivo (M€)	Acumulado	€/KM	Tipo de Interés	Costes Con Mantenimiento Predictivo (M€)	Acumulado	€/KM
0	230,89 M€	230,89 M€		-	230,89 M€	230,89 M€	
1	233,20 M€	464,10 M€		1 %	466,51 M€	697,47 M€	
2	235,53 M€	669,64 M€		1 %	460,86 M€	1.158,27 M€	
3	239,31 M€	938,95 M€		1,2 %	457,76 M€	1.616,04 M€	
4	242,18 M€	1.181,13 M€		1,2 %	452,64 M€	2.068,68 M€	
5	245,08 M€	1.426,22 M€		1,2 %	447,34 M€	2.516,02 M€	
...							
24	307,43 M€	6.684,07 M€		1,2 %	193,68 M€	6.782,20 M€	
25	311,12 M€	6.995,19 M€		1,2 %	196,07 M€	6.978,21 M€	
26	314,85 M€	7.310,05 M€		1,2 %	300,63 M€	7.397,63 M€	
27	318,63 M€	7.628,69 M€		1,2 %	304,23 M€	7.278,84 M€	
28	322,45 M€	7.951,15 M€		1,2 %	307,88 M€	7.583,08 M€	
29	326,32 M€	8.277,47 M€		1,2 %	311,58 M€	7.890,97 M€	
30	330,24 M€	8.607,72 M€		1,2 %	315,32 M€	8.202,56 M€	
31	334,20 M€	8.941,93 M€		1,2 %	210,55 M€	8.517,88 M€	
...					...	...	
72	545,02 M€	26.720,95 M€		1,2 %	343,36 M€	21.420,28 M€	
73	551,56 M€	27.272,52 M€		1,2 %	347,48 M€	21.767,76 M€	
74	558,18 M€	27.830,70 M€		1,2 %	351,65 M€	22.119,42 M€	
75	564,88 M€	28.395,55 M€		1,2 %	355,87 M€	22.475,30 M€	
	28.395,55 M€				22.475,30 M€		

Fuente: Propia.

Figura 12. Estudio comparativo para aplicación de Sistema para Mantenimiento Predictivo.



Fuente: Propia.

3. Caracterización del Nuevo Sistema de Mantenimiento.

El mantenimiento predictivo se basa en métodos y herramientas diseñados para ayudar a determinar la condición del equipo en servicio conforme a la identificación de fallos antes de que ocurran y predecir cuándo se deben realizar las tareas de mantenimiento correspondiente.

El CBM (Condition Based Monitoring/Maintenance) establece un control continuo de los parámetros definidos en los equipos/sistemas supervisados. El tener una monitorización ininterrumpida, supone la necesidad de herramientas tecnológicas e informáticas específicas, además de una buena definición de la arquitectura de sensores. Las principales ventajas obtenidas tras implementar sistemas CBM son la monitorización continua de la condición mecánica de los equipos críticos y la identificación/predicción de problemas. (20)

En un contexto donde los administradores y mantenedores están empezando a concienciarse de forma incremental sobre la optimización de los costes de mantenimiento, las soluciones de mantenimiento predictivo proporcionan mayor eficiencia en el rango de los procesos de mantenimiento porque entre otras optimizan el tamaño de la flota mediante el aumento de disponibilidad del tren, reduciendo el coste total del ciclo de vida e incrementando el ciclo de vida de la infraestructura y superestructura. Por citar un ejemplo, en la industria ferroviaria, la compañía Eurotunnel tiene como objetivo la extensión del ciclo de vida de su infraestructura entre un 30% y un 50%, reduciendo las necesidades de mantenimiento entre un 20 y un 30% mediante la activación de un programa de mantenimiento predictivo. (12)

La solución de mantenimiento predictivo mediante sistemas de monitorización, hacen lo posible para determinar el estado de la vía, la infraestructura y la señalización de forma automática y para la identificación de componentes que precisan de reparación o sustitución en su fecha prevista.

Todos los componentes de la instalación ferroviaria estarán dotados de capacidad de comunicación, lo que les permitirá generar gran cantidad de información sobre su funcionamiento que enviarán al centro de datos correspondiente (cloud computing) para su posterior análisis determinando los planes de actuación reales que se han de realizar en las instalaciones. Las grandes bases de datos que se generen, permitirán tratar en tiempo real los problemas correspondientes al ciclo de vida útil de la plataforma y de los diferentes equipos que componen la superestructura ferroviaria. A través de las tendencias de los datos a largo plazo, se permitirá descifrar y anticiparse a determinados comportamientos anormales de la infraestructura y los equipos de vía. El trabajo de mantenimiento por tanto, se fundamentará en el tratamiento de toda esta gran cantidad de datos.

La derivación y puesta en marcha de medidas están condicionadas por muchas condiciones de contorno que no están relacionadas directamente con el sistema. Las evaluaciones técnicas de última tecnología, constituyen una base para la toma de decisiones absolutamente necesaria, pero estas, no pueden suplir directamente a las “medidas analógicas” empleadas. A la hora de planificar y poner en marcha estas medidas, se deben tener en cuenta los aspectos económicos, la planificación de recursos y los aspectos operativos para poder garantizar que se aplica la medida pertinente en el momento adecuado y en lugar correcto. Este mundo analógico no cambiará prácticamente en el futuro, mientras que las posibilidades digitales para la evaluación de estado de los sistemas seguirán evolucionando de manera vertiginosa. En relación con la base para la toma de decisiones, hay que utilizar los mejores conocimientos disponibles. (21)

Se precisará realizar diferentes modelos de optimización de tiempos de replazo y tiempos de inspección mediante métodos de investigación operacional y optimización estadística a realizar por expertos ingenieros de mantenimiento. Esto implicará que los profesionales del mantenimiento deberán adquirir nuevos conocimientos tecnológicos como protocolos de comunicación IP, conocimiento de la cadena de valor del negocio, gestión de bases de datos, etc

A nivel global, en el sector ferroviario los fallos y averías de los activos críticos afectan directamente al rendimiento, al coste de operaciones y a la rentabilidad. (20)

CBM. Condition-based Maintenance.

Este tipo de mantenimiento nace en un contexto en el que la cultura de Mantenimiento comúnmente establecida a nivel global se caracteriza en una combinación de tareas correctivas y preventivas (basadas en la experiencia), con baja implementación de mantenimiento predictivo. El camino hacia la excelencia en el Mantenimiento comienza por una planificación del Mantenimiento basada en la disponibilidad de los activos, evitando tareas de correctivo urgente. En este nuevo Plan de Mantenimiento, deberán tener una elevada implicación las tareas de Preventivo, Predictivo y CBM (Mantenimiento basado en Condición). Implementar herramientas de monitorización on-line de los activos supone una serie de beneficios de índole notable: (20)

- Alcanzar la vida útil de los activos y prolongarla.
- Reducción de tareas de mantenimiento y aumento de la disponibilidad de los activos.
- Notificaciones en tiempo real.
- Monitorización del rendimiento de los activos.
- Monitorización Predictiva.
- Sistemas de alerta temprana.
- Reconocimiento de patrones de fallo.

Estos beneficios, pueden verse cuantificados en forma de ahorros en el mantenimiento en los niveles que se muestran a continuación:

Tabla 4. Beneficios del Predictivo/CBM en el sector ferroviario.

BENEFICIOS GENERADOS POR UN MANTENIMIENTO PREDICTIVO	
Beneficio Reducción de Costes de Mantenimiento:	20% a 25%
Eliminación de Averías:	70% a 75%
Reducción en el tiempo de Inactividad	35%
Incremento de Producción	20% a 25%
Reducción gastos tiempos Extras	20%
Prolongación del Ciclo de Vida Útil de la Infraestructura:	20% a 25%

Fuente: Passenger Rolling Stock Maintenance

El CBM contempla el Plan de Mantenimiento Predictivo, apoyado en una herramienta de software, con una base de Modelado Matemático-computacional Avanzado. Para la implementación exitosa de un Sistema de Mantenimiento Predictivo robusto es necesario el desarrollo de un PMO (Plan de Mantenimiento Optimizado) enfocado en la Fiabilidad/Disponibilidad de los Activos (RCM).

Para poder elaborar una herramienta software CBM para la monitorización del mantenimiento mediante predicción de fallos y análisis de la vida útil de los equipos e infraestructura, será necesaria la convergencia y dominio de las siguientes competencias:

Ingeniería de Mantenimiento, mediante el desarrollo de planes de mantenimiento optimizado y análisis de mantenimiento predictivo y preventivo.

Tecnología, implementación de nuevas tecnologías que permitan la conexión de todos los dispositivos entre sí, para recolectar y procesar localmente datos, mediante las tecnologías de comunicación necesarias.

- Analítica Avanzada.
- Análisis Predictivos, soporte para la implantación de sistemas de monitorizado y análisis de fuentes.

Analítica Avanzada.

Ante la necesidad de gestionar la gran cantidad de información que procede de los diferentes sistemas comentados, se precisará de una analítica avanzada. Esta no es más que una metodología y complejo proceso que se enfoca en usar de manera correcta estos datos para poder pronosticar eventos y comportamientos futuros de los sistemas anteriores, de manera que se pueda “predecir” dicho comportamiento y se garantice así la máxima calidad en la explotación de la línea ferroviaria.

Mediante la extracción del valor añadido que poseen los datos históricos (o generados), se generará conocimiento en base a la experiencia. El valor añadido que aporta, es que se podrá utilizar para la definición y puesta en marcha de nuevas acciones con impacto directo en la explotación de una línea ferroviaria, buscando los mejores resultados para los administradores y operadores de la línea.

La analítica avanzada se divide en:

- **Business Intelligence.**

El término Business Intelligence (BI), se refiere al uso de datos en una organización para facilitar la toma de decisiones. Mediante el análisis de datos, se determinarán las estrategias a seguir en las acciones relacionadas con el mantenimiento de la línea ferroviaria. Business Intelligence es la habilidad para transformar los datos en información, y la información en conocimiento, de forma que se pueda optimizar el proceso de toma de decisiones.

- **Business Analytics.**

El término Business Analytics (BA), se refiere al análisis de datos mediante el uso de técnicas y herramientas que permitan analizar de forma conjunta todos los datos, con el fin de encontrar relaciones entre ellos y detectar tendencias (predecir). Las aplicaciones BA centralizan información procedente de fuentes diversas, y permiten crear paneles con informes (listados, gráficos...) que facilitan el análisis desde múltiples perspectivas. Existen muchas aplicaciones de analítica de negocio que ya se encuentran disponibles en ediciones en cloud o software como servicio (SaaS).

En síntesis, podemos entender el Business Intelligence como las formas de recolectar y entender datos del pasado, mientras que el Business Analytics nos permite construir una visión más clara del futuro.

Technical Backend.

Para poder realizar todo el análisis anterior, se precisa físicamente de lo que se denomina un sistema “Technical Backend”. El Back-End, es la capa de acceso a los datos y la infraestructura

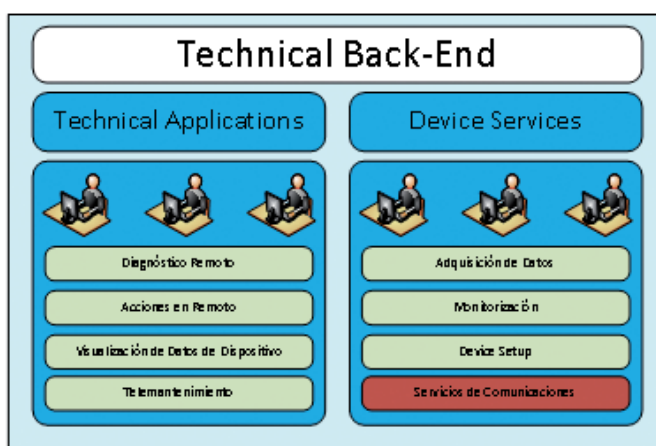
física o hardware donde se dispone de toda la información recibida desde todos y cada uno de los dispositivos que tenemos instalados en la línea ferroviaria. En un modelo de cliente-servidor, el back-end se correspondería con la parte del servidor, es decir donde se encuentra y se procesa toda la información que se recibe de los diferentes clientes que están conectados a la red. TB, es el administrador general con sus respectivos sistemas así como el servicio que procesa la información que le llega desde los elementos que envían datos (administrador del sitio con sus respectivos sistemas).

En nuestro caso, el back-end estaría formado por dos grandes grupos:

- Technical Applications, entre las que destacan las tareas de diagnóstico remoto, visualización de datos de dispositivo, Telemantenimiento, etc...
- Device Services, entre las que destaca la adquisición de datos, monitorización y los servicios de comunicaciones.

Figura 13. Technical Back-End.

Fuente: Propia.



Operations Dashboard.

El Operations Dashboard, o “tablero de operaciones”, será la interface que se disponga en todos los Centros de Regulación y Control propiedad del Administrador ferroviario desde donde se supervisan las líneas de Alta Velocidad, y desde donde se podrá visualizar en todo momento el estado completo de toda la infraestructura y sistema ferroviario.

En coordinación directa con el sistema SAM de ayuda al mantenimiento, se trata de un interface gráfico de uso interno que nos informará del estado y su evolución de todos los elementos de la infraestructura/superestructura que se están monitorizando así como de los procesos de mantenimiento que se deben realizar en determinados puntos de la infraestructura/superestructura ferroviaria basado en toda la información y parámetros contenidos en la nube, y que han sido recibidos, almacenados y procesados durante un tiempo determinado en la misma.

Este sistema nos permitirá también poder configurar y parametrizar los diferentes status y valores que queremos controlar de toda la red, pudiendo tomar decisiones sobre la gestión del tráfico ferroviario y los sistemas de seguridad y protección Civil si así fuera necesario.

Figura 14. Ejemplo de Operations Dashboard sobre inspección de cruce ferroviario.



Fuente: Esri.

Plataforma IoT.

Para esta solución que se propone, se plantea el uso de una nube privada. Se necesita una alta protección de datos y ediciones a nivel de servicio. Las nubes privadas están en una infraestructura bajo demanda, gestionada para un solo cliente que controla qué aplicaciones debe ejecutarse y dónde. Son propietarios del servidor, red, y disco y pueden decidir qué usuarios están autorizados a utilizar la infraestructura. Al administrar internamente estos servicios, las empresas tienen la ventaja de mantener la privacidad de su información y permitir unificar el acceso a las aplicaciones corporativas de sus usuarios.

La plataforma de servicios en la nube es la capa superior donde se centralizan los servicios de la estructura IoT. Ofrece un alto valor añadido donde se puede ver con claridad el salto de calidad que se consigue al adoptar una solución IoT, su balanza de costes y beneficios y el retorno de la inversión realizada. Proporciona acceso rápido y flexible a recursos informáticos de bajo costo. Gracias a la informática en la nube, no se precisa realizar grandes inversiones iniciales para la adquisición de equipos ni se tendrá que dedicar mucho tiempo a la administración de dichos equipos.

Existe una oferta variada de plataformas en la nube sobre las que crear la aplicación IoT. Algunas, dirigidas a soluciones de proyectos IoT industriales de grandes dimensiones, como M2X, Thingworks, Axeda, Exosite o Cumulocity y las plataformas base de los tres grandes de internet como Microsoft Azure, GoogleCloud o AWS Amazon que ofrecen servicios completos de infraestructura para desarrolladores en diferentes ámbitos.

Estas grandes plataformas IoT están pensadas como soluciones integrales para todos los tipos de servicio que se pueden ofrecer desde la nube (Big Data, Hosting Web, Cloud Computing, etc... y en general todas las tendencias tecnológicas nacidas con internet. Estas plataformas disponen de innumerables servicios como máquinas virtuales, aplicaciones, bases de datos, backup, servidores, redes virtuales, control de tráfico, etc... diseñadas para gestionar miles de millones de dispositivos IoT. Establecen una comunicación bidireccional ofreciendo el estado

de todos los dispositivos y recursos, permitiendo ejecutar acciones sobre ellos y controlando el flujo de mensajes con acuse de recibo.

Cloud Computing.

El modelo de cloud computing que se adapta a esta necesidad de mantenimiento es el modelo de PaaS (Plataforma como servicio). Las Plataformas como servicio eliminan la necesidad de las compañías de administrar la infraestructura subyacente (normalmente hardware y sistemas operativos) y le permiten centrarse en la implementación y la administración de sus aplicaciones. Esto contribuye a mejorar su eficacia, pues no tiene que preocuparse del aprovisionamiento de recursos, la planificación de la capacidad, el mantenimiento de software, los parches ni ninguna de las demás arduas tareas que conlleva la ejecución de su aplicación.

La vuelta de los datos a las APP - Aplicaciones tecnológicas “APPs” que facilitan la comunicación con el personal dedicado al mantenimiento de las instalaciones ferroviarias para determinar su estado, si toca pasar la inspección, avisos de avería, etc... Inclusive, se permitiría interaccionar con los equipos y/o las instalaciones.

La suma del “Smart Data” y el “Machine Learning” (aprendizaje automático) nos permitirá que las instalaciones estén perfectamente adaptadas a las necesidades de explotación, consiguiendo una disponibilidad mayor de la infraestructura y superestructura ferroviaria.

4G-LTE vs. 5G.

En el entorno ferroviario, cada vez más la operación y gestión eficiente de la infraestructura y del material rodante requiere la integración inteligente de información en tiempo real en los procesos de operación y decisión. Todo esto tiene como consecuencia el incremento significativo de las necesidades de comunicación entre el tren en movimiento con los sistemas en la vía, así como todos ellos con los diferentes centros de Control.

La adaptación de la tecnología 4G/LTE al entorno ferroviario debe ser similar al de la tecnología GSM-R que surgió como evolución del sistema GSM público, al que se le añadieron mejoras, funcionalidades y servicios de valor añadido para el sector ferroviario.

La tecnología 4G/LTE pública está ya disponible. Existirá una evolución similar de estandarización, desarrollo y pruebas durante los próximos años, para que hacia 2.020 se disponga de una tecnología LTE-R que pueda ser aplicada al ferrocarril.

Ante la ola de conectividad que inundará millones de dispositivos a lo largo de los próximos años con el despliegue del IoT (internet de las cosas), se comienza a hablar de la que será la tecnología de comunicación móvil del futuro: el 5G. Esta tecnología va a proveer a millones de sensores, dispositivos, y todo tipo de aparatos la posibilidad de conectarse a internet superando las actuales barreras de transmisión y energía. La mezcla entre Alta Velocidad (de comunicaciones) y baja latencia (apenas 1ms), romperá todas las barreras hasta ahora imaginables ofreciendo conexiones superiores a 1 Gbps (las actuales 4G/LTE están en torno a los 20 Mbps).

El 5G permitirá la conexión de millones de dispositivos a Internet, pero buena parte de ellos apenas necesitarán enviar pequeñas cantidades de información cada varias horas a través de internet. Será fundamental establecer protocolos de bajo ancho de banda para optimizar el tráfico de estos nuevos dispositivos. 5G es una redefinición de las redes móviles que permitirá la conexión de millones de dispositivos transformando diferentes industrias como la del automóvil, la robótica, la salud y servirá para el despegue definitivo tanto del Internet de las Cosas (IoT) como de los wearables.

4. Estructuras de Red. Arquitectura de Sensores.

“Una red es tan fuerte como los nudos que la mantienen unida”. (22) Esto también es válido para los sistemas conectados de la infraestructura del ferrocarril con sus diferentes niveles y componentes.

Las interfaces establecidas para la transmisión y el intercambio de datos o paquetes de estos entre diferentes equipos y sistemas, constituyen la base de funcionamiento de sistemas como los enclavamientos, sistemas de monitorización y diagnóstico, sistemas de señalización, etc... Por ello, los fabricantes de los componentes, equipos y sensores, deben garantizar la compatibilidad de los mismos para que se puedan comunicar con las estructuras existentes y con otros sistemas.

Las interfaces están soportadas por medios físicos, entre los que se encuentran, además de la fibra óptica (LWL), las conexiones por radio y los cables de cobre. Lo esencial es que, en el sector ferroviario, se han de tener en cuenta las exigencias dispuestas en la norma EN 50159 para la comunicación relacionada con la seguridad en los sistemas de transmisión.

La transferencia de datos necesita de interfaces adecuadas con los protocolos correspondientes. Protocolos basados en el UDP/IP permiten la comunicación entre dos puntos cumpliendo además las exigencias de CENELEC SIL 4 y EN 50159 categoría 2. Ethernet marca el estado actual de la técnica y se puede utilizar en la mayoría de las redes existentes de manera estándar sin suponer costes de hardware adicionales. Ethernet permite una transmisión de datos a gran velocidad, a veces hasta en tiempo real.

Otro de los grandes desafíos de la implementación empresarial de elementos IoT tiene relación con definir y planificar como se integrarán estos elementos en la actual infraestructura así como identificar los diferentes dominios de protección. (23)

En los párrafos siguientes, detallamos como sería la estructura de Red para la solución que se propone, identificando y describiendo a alto nivel cada uno de los nodos o “subredes” participantes en esta propuesta que se realiza.

Arquitectura de Sensores. Red local.

A lo largo del trazado de una línea ferroviaria, se dispondrá de diferentes equipos concentradores de dispositivos que cubrirán un área longitudinal determinada. Se trata de elementos tipo “Hub” donde se conectarán todos los elementos de campo distribuidos (sensores de campo), generando una nueva red, centralizando así todo el cableado de los mismos y permitiendo la posibilidad de ampliación de la propia red. Junto con el Hub o concentrador, se instalará un Router que permitirá el uso de varias clases de direcciones IP dentro de la misma red, permitiendo así la creación de sub-redes “de campo”.

Para todos los sistemas especificados en el apartado 2, la elección de los sensores vendrá determinada por la identificación previa de las variables a monitorizar, teniendo en cuenta los tipos de salida y posibilidades de interface con otros dispositivos que ofrecen, o en caso necesario, si precisa de dispositivos de acondicionamiento de señal para poder ser interpretada correctamente.

Generalmente y en su mayoría todos los equipos que componen los concentradores de señales se encontrarán ubicados en casetas de vía a pie de esta y en su interior albergarán los servidores correspondientes (si se precisan), equipos de comunicaciones y conmutación (Router, Switch, etc...), los dispositivos de alimentación y SAI para el suministro de energía, así como todos los elementos de conexión y adaptación de señales que sean necesarios todo bajo entornos de “Industrial Ethernet”.

Figura 15. Caseta de Vía para LZB en LAV Madrid - Sevilla.



Fuente: CHA.

Los concentradores embarcados, de arquitectura similar a los anteriores, llevarán todos sus equipos a bordo del tren en el que se instalen, estableciendo la comunicación mediante un enlace inalámbrico.

Se representan y detallan los diferentes y más significativos tipos de concentradores de señales que establecemos en el proyecto.

Configuración Segura de la Red Local.

Generalmente, se deberán tener en cuenta dos aspectos fundamentales:

- La implementación de un buen cortafuego donde sólo se permita iniciar conexiones por los elementos conectados en el interior de la red, será uno de los primeros puntos a considerar en la configuración de la Red local.
- Parametrización y ajuste de puertos mediante el cual, lo ideal sería cerrar todos los puertos y sólo dejar abiertos los estrictamente necesarios y de los que se harán uso. La implantación de reglas NAT o direccionamiento de puertos, de forma que se redireccionen las conexiones de un puerto mucho menos usado y común a un equipo que escuche en un puerto común y más susceptible de ser atacado directamente.

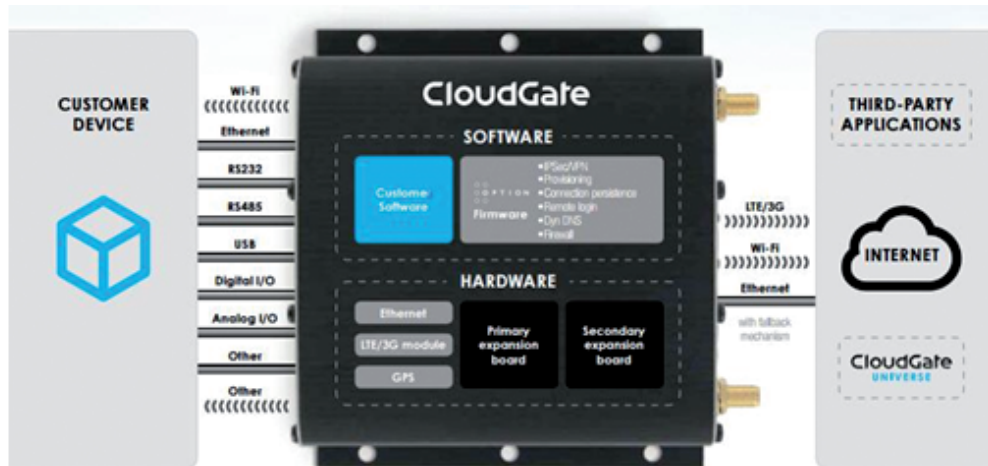
Con estas dos medidas fundamentales, aseguraríamos la red local de elementos y dispositivos que se van a conectar mediante el IoT. (24)

Gateway de Conexión (Solución CloudGate).

Para completar la solución IoT y conectar los dispositivos con la plataforma adecuada, se precisa disponer de un gateway para la comunicación. Los equipos de conexión actuales requerirán de un pequeño desarrollo para configurar la compatibilidad con la plataforma en la nube seleccionada.

CloudGate es un dispositivo ruggedizado de gama industrial que facilita comunicación LAN, funcionalidad GPS y acceso a la red pública o de operador 3G/4G (LTE). Ofrece conexión directa a varias plataformas y es un elemento muy flexible. A nivel de hardware, ofrece disponibilidad para insertar tarjetas compatibles con las interfaces deseadas. A nivel de software, programable mediante una aplicación gráfica “drag and drop” denominada “LuvitRed” donde se encuentran predefinidos los nodos que dan acceso a múltiples plataformas. (12)

Figura 16. Smart Wireless



Fuente: CloudGate.

Connected Trackside (Sensor Box).

Se trata de un dispositivo concentrador (Red local) que permite la conexión de múltiples señales que provienen de diferentes dispositivos que se encuentran ubicados y extendidos a lo largo de la línea ferroviaria. Se le ha denominado “Sensor Box”. Cada uno de estos sensores, incorporará la tecnología e interfaces necesarios para adaptar sus señales e información a transmitir/recibir a los protocolos estándar establecidos en la propia red local. Sensor y su tecnología necesaria de interface, estarán ubicados en lugares muy próximos.

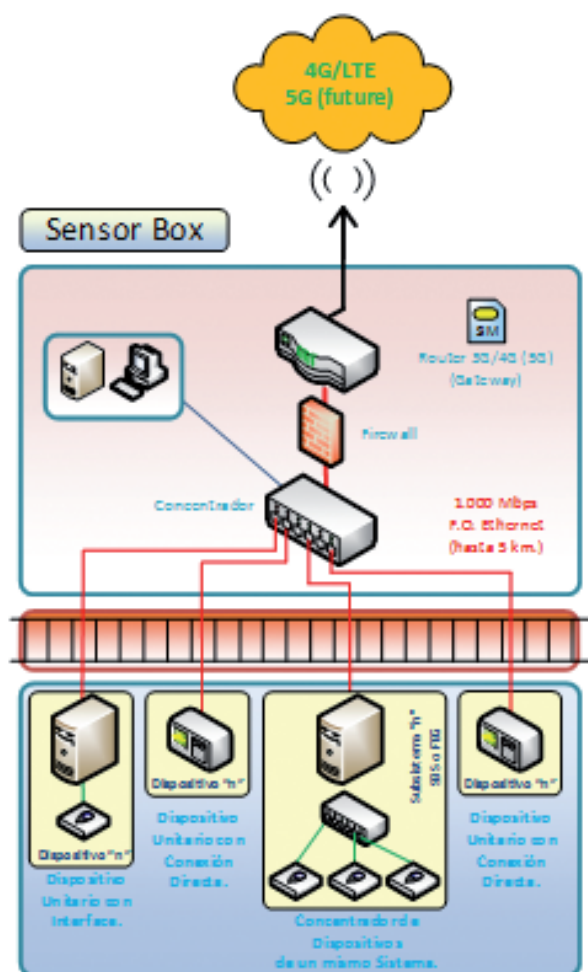
Tabla 5. Relación de Equipos y Sistemas que se pueden conectar a un “Sensor Box”.

SISTEMA EMPLEADO	DESCRIPCION	INTERFACE
Tecnología GIS		
Tomografía Sísmica	Sismógrafo Multicanal + Geófonos a aplicar en Trincheras y Terraplenes.	Sismógrafo
Tomografía Eléctrica	Resistivímetro + 64 Electrodo a aplicar en Trincheras y Terraplenes.	Resistivímetro
FBG - Difracción de Bragg.	Interrogador - Concentradores de Señales por F.O. A aplicar en viaductos metálicos, auscultación de túneles, y en Vigilancia de la línea aérea de contacto.	Interrogador
Georadar - GRR.	Ground Penetration Radar, a aplicar en elementos estructurales de Hormigón.	Unidad Control
DAS - Distributed Acoustic Sensing.	Línea F.O. por debajo lecho de Balasto.	Unidad Control
SBS - Simulated Brillouin Scattering)	Línea F.O. distribuido paralela al carril para su vigilancia y detección temprana de rotura.	Interrogador.
Inclinómetros & Galgas Extensiométricas.	Asentamiento Losa/Prelosa en Vía en Placa.	Unidad Control
Sensórica específica para Compensación de Catenaria.	Compensación mecánica en Catenarias. Vigilancia mediante Galgas extensiométricas, y sensórica específica para cilindros de contrapeso.	Unidad Control
Aparatos de Vía.	Dispositivo específico de monitorización de estado de todos los dispositivos de los aparatos de vía.	Unidad Control
Dispositivos de Supervisión para Sistemas Auxiliares de Detección.	Sensórica específica para detección de funcionamiento incorrecto de DCC's, DVL's, DCO's, DIT's, DOA's, DCPC's...	Unidad Control

Fuente: Propia.

Se plantea esta configuración de red basada en el estándar Ethernet (IEEE 802.3), con topología en estrella y tecnología 1000Base-LX (1000 Mbit/s), con distancias máximas de cableado de los sensores y sus interfaces hasta el concentrador (caseta de vía) de hasta 5 km, cableado que se realizará mediante fibra óptica monomodo.

Figura 17. Arquitectura de Sensores o Nodo diferenciado.



Fuente: Propia.

Consideramos que la aplicación del protocolo MQTT-S (MQ Telemetry Transport) es el que mejor se adapta a esta necesidad. Este protocolo está orientado a la comunicación de sensores (IoT), debido a que consume muy poco ancho de banda y puede ser utilizado en la mayoría de los dispositivos empotrados con pocos recursos (CPU, RAM, ...). La arquitectura de MQTT sigue una topología de estrella, con un nodo central que hace de servidor o “broker” con una capacidad de hasta 10.000 clientes, más que suficiente para lo que se propone.

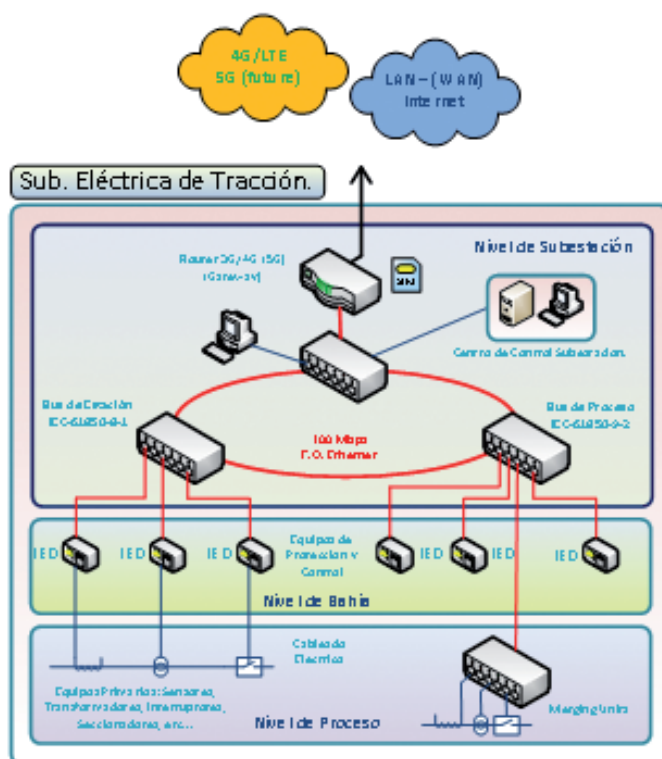
Connected Trackside (Electric Substation).

Para las subestaciones de tracción, se desarrollará conforme al estándar IEC-61850. Este estándar, tiene dos aplicaciones principales: el bus de estación y el bus de proceso. Los dispositivos situados en el nivel de subestación y el nivel de bahía estarán conectados entre sí mediante el denominado bus de estación (relés-IED's y RTU'S que se conectan directamente a una LAN-Ethernet), mientras que los dispositivos situados en el nivel de bahía y los dispositivos

del nivel de proceso lo estarán mediante el bus de proceso (dispositivos CT/VT que proporcionan los valores de corriente y voltaje directamente sobre la LAN-Ethernet).

La capa física, se compone de dos opciones: eléctrica y óptica. El protocolo de comunicación en subestaciones podría ser el protocolo Ethernet (TCP/IP), mediante el uso del algoritmo CSMA/CD, con una arquitectura en estrella por la que todos los equipos IED estarían conectados entre si a través del Switch.

Figura 18. Arquitectura de Sensores para Subestación Eléctrica de Tracción.



Fuente: Propia.

La subestación se divide en tres niveles: nivel de subestación, nivel de bahía y nivel de proceso, según se detalló en el apartado 2.4.

La conexión con el medio exterior, se podrá realizar bien mediante el acceso directo a la nube a través de la tecnología inalámbrica 4G/LTE (futuro 5G) o bien mediante conexión directa a red WAN, que proporcione los servicios correspondientes a Internet.

Connected Trackside (Technical Building).

El edificio técnico es uno de los elementos más crítico de una línea ferroviaria de alta velocidad. En ellos residen los equipos electrónicos de mayor peso que supervisan, controlan y gestionan todo el tráfico ferroviario y la seguridad de la línea. Todos estos equipos se encuentran generalmente conectados a la red privada de señalización (interconexión entre Enclavamientos, sistemas ERTMS como RBC y CLC, y SAM).

Es en estas instalaciones donde se concentra toda la información relacionada con los equipos que se detallan en la siguiente tabla. Para algunas de ellas, como los equipos de transporte SDH/PDH y los equipos MSC - GSM-R, son sus propias instalaciones las que actúan como edificio técnico.

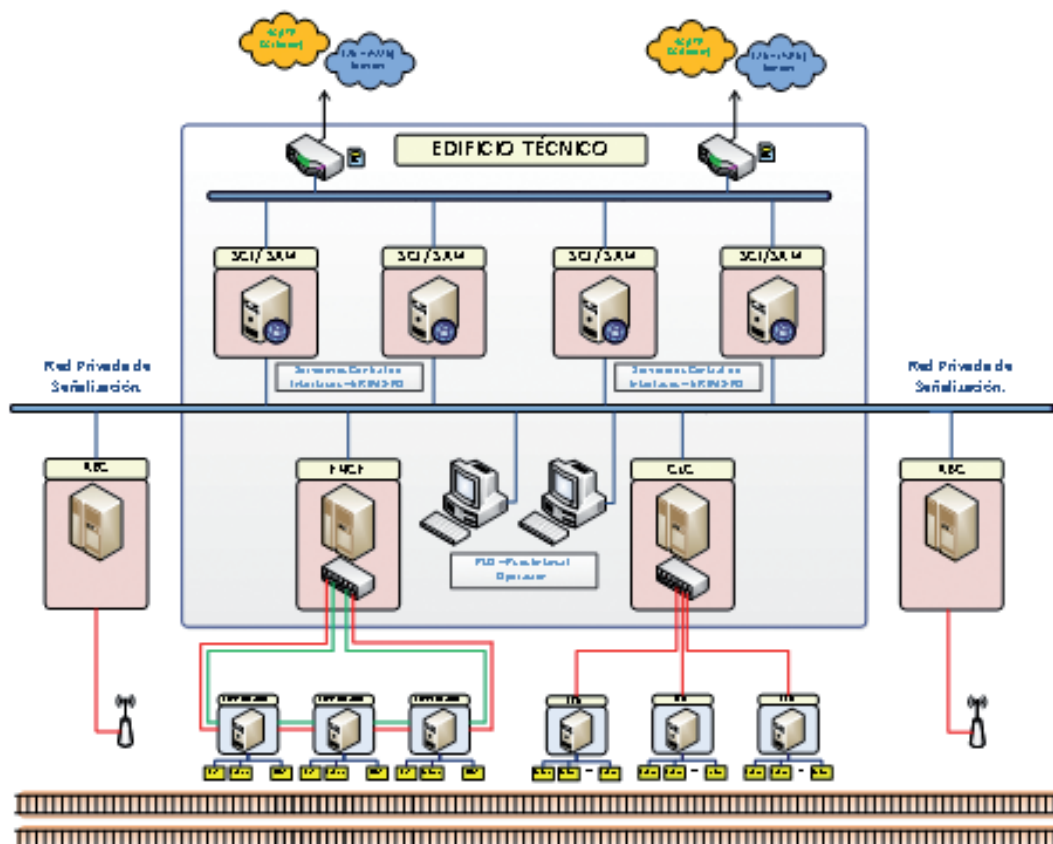
La conectividad entre los equipos se facilita a través de la red GbEt/MPLS, instalándose los correspondientes equipos (Switch L3). En este caso, dispondremos Routers de gama industrial como plataforma de comunicación multiservicio LAN y con acceso a la red pública o de operador 3G/4G (LTE), para conexión con “la nube”.

Tabla 6. Relación de Equipos y Sistemas que se pueden conectados al Technical Building.

SISTEMA EMPLEADO	DESCRIPCION	INTERFACE
ENCE - Enclavamientos Electrónicos	Enclavamiento Electrónico.	ENCE
Subsistemas conectados a los ENCE.	Concentradores y Controladores de Objetos. Circuitos de Vía, sensores de Rueda, o contadores de Ejes.	ENCE
Sistemas de Protección ATP.	Controladores de LEU's (CLC's). LEU's con lazos y balizas. RBC's, con sus correspondientes BTS's.	CLC & RBC
Fibra Óptica	Supervisión del estado de instalaciones de F.O.	URT (Unidad Remota de Test)
Equipos de Transporte SDH/ PDH		
Equipos Core MSC - GSM-R		

Fuente: Propia.

Figura 19. Arquitectura para el Sistema de Señalización y Protección.



Fuente: Propia.

Connected Station (Station Network).

Por cada una de las estaciones de viajeros, se dispondrá de una red local (LAN) que centralice y recoja información de los principales dispositivos que podemos encontrarnos en la misma, conforme se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 7. Relación de Equipos y Sistemas conectados en una Station Network

SISTEMA EMPLEADO	DESCRIPCION	INTERFACE
Equipos de Elevación (Ascensores)	Dispositivo propio integrado en maniobra que se encarga de recolectar información propia de cada ascensor.	Dispositivo Propio.
Equipos de Transporte de personas (Escaleras mecánicas, pasillos rodantes, etc.)	Dispositivo propio (maniobra o PLC) que se encarga de recolectar información de funcionamiento de cada ascensor.	PLC o placa de control.
Expendedoras de Tickets.	Dispositivos de venta y expedición de tickets con interface propia TCP/IP	Interface Propia.
Dispositivos de Peaje.	Tornos de acceso a zona de viajeros.	
Abastecimiento y Generación de Energía.	Inversores y elementos de almacenamiento/recuperación de energía de los elementos móviles (ascensores, escaleras, pasillos, etc.).	PLC o placa de control
Paneles de Información	Dispositivos de información con Interface TCP/IP.	Interface Propia

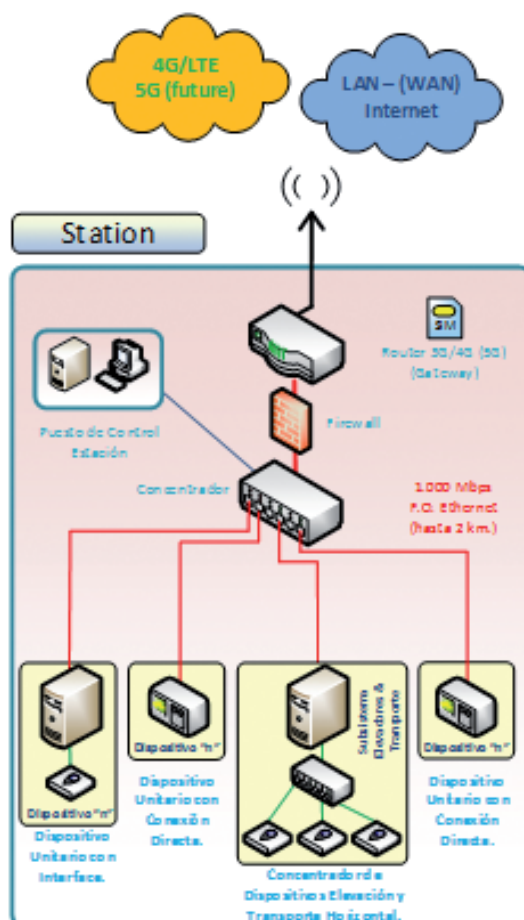
Fuente: Propia

Al igual que para los dispositivos “Sensor Box” o elementos distribuidos en vía, se plantea una configuración de red basada en el estándar Ethernet (IEEE 802.3), con topología en estrella y tecnología 1000Base-LX (1000 Mbit/s), con distancias máximas de cableado desde los equipos (con sus interfaces donde precise) hasta el concentrador (P. ej. En el CPD de la estación) de hasta 2 km, mediante cableado de fibra óptica monomodo.

Para los equipos de elevación y transporte vertical, se propone la instalación de un servidor o dispositivo que centralice toda la información procedente de los mismos (generalmente uno por cada proveedor), y que sea este equipo el que se conecte con la nube aportando y recibiendo toda la información requerida. En cuanto al protocolo, se plantea el uso del protocolo Ethernet (TCP/IP) mediante el uso del algoritmo de acceso al medio CSMA/CD más normalizado para los equipos que componen esta red local (LAN de estación).

La conexión con el medio exterior, se podrá realizar bien mediante el acceso directo a la nube a través de la tecnología inalámbrica 4G/LTE (futuro 5G) o bien mediante conexión directa a red WAN, que proporcione los servicios correspondientes a Internet.

Figura 20. Arquitectura para Red Local de Estaciones.



Fuente: Propia

Connected Trains (On board).

Muchos de los sistemas que se proponen, requieren ir embarcados en los vehículos que realizan las circulaciones habituales por las líneas de explotación. En estos casos, nos encontramos con multitud de dispositivos de diferentes funciones, que se integrarían dentro de la propia red de comunicaciones embarcada en el tren (TCN-Ethernet), o bien formando una red propia dedicada.

El estándar de comunicaciones TCN (IEC-61375/IEEE 1473-T) se realiza mediante una arquitectura de buses jerarquizada en dos niveles: bus de tren o WTB (interconecta los vehículos del tren) y un bus de vehículo MVB que interconecta los equipos embarcados en un entorno local del vehículo. Ambos utilizan un protocolo maestro-esclavo. (25)

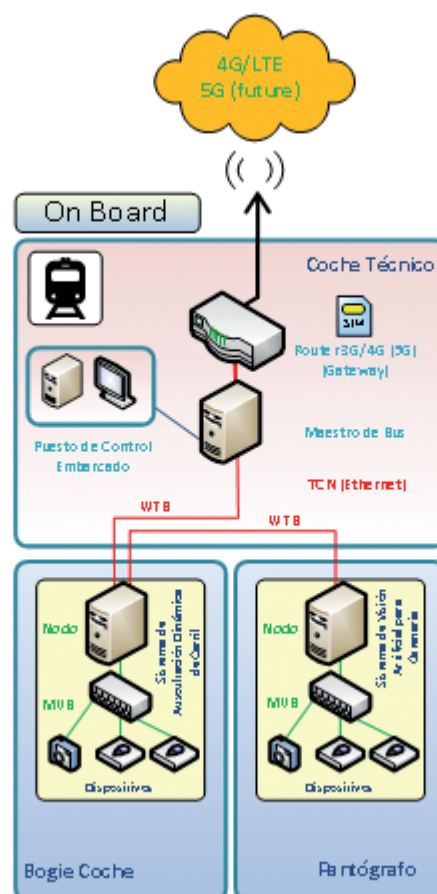
Tabla 8. Relación de Equipos y Sistemas embarcados.

SISTEMA EMPLEADO	DESCRIPCION	INTERFACE
Auscultación Dinámica	Sistema Laser de Auscultación para vigilancia de parámetros de vía a Alta Velocidad mediante. Paquetes inerciales y cámaras digitales.	
Inspección Ultrasónica	Ruedas como unidades de medición Rodante (RSU).	
Termografía Infrarroja.	Verificación “en carga” línea aérea de contacto.	
Visión Artificial.	Cámaras de última Generación. Análisis del hilo de Contacto. Cámaras láser, infrarrojas y de vídeo.	

Fuente: Propia.

A bordo de las circulaciones, se dispondrá de un Router específico como plataforma de comunicación multiservicio para entornos ferroviarios, que proporcionaría comunicaciones fiables 4G/LTE y de banda ancha por Wi-Fi, contando con opciones de redundancia, agregación y mecanismos avanzados de seguridad de red. Su diseño de hardware será conforme a las normativas ferroviarias, especialmente diseñado para su instalación en trenes de alta velocidad (EN 50155, EN 50121-3-2, EN 455...).

Figura 21. Arquitectura Sistemas Embarcados.



Fuente: Propia.

Red de Datos de Mantenimiento.

Todos estos elementos y dispositivos se configurarán dentro de una red VPN (Virtual Private Network), lo que permite crear una red local sin necesidad de que todos los componentes de todos los “Sensor Box” estén conectados físicamente sino que dicha conexión, se realizará a través de Internet. Al estar conectados mediante VPN, las conexiones van acompañadas de un cifrado de los paquetes que se transmiten entre los diferentes sensores y servidores de datos.

Arquitectura de Comunicaciones.

A lo largo de una línea ferroviaria, nos encontraremos con múltiples dispositivos concentradores o subredes locales en las que se encuentran conectados los diferentes dispositivos y sensores repartidos a lo largo de la línea. Por otro lado, los trenes en circulación pueden contener sistemas embarcados de medición, auscultación y visión, que también están en contacto permanente con la red general.

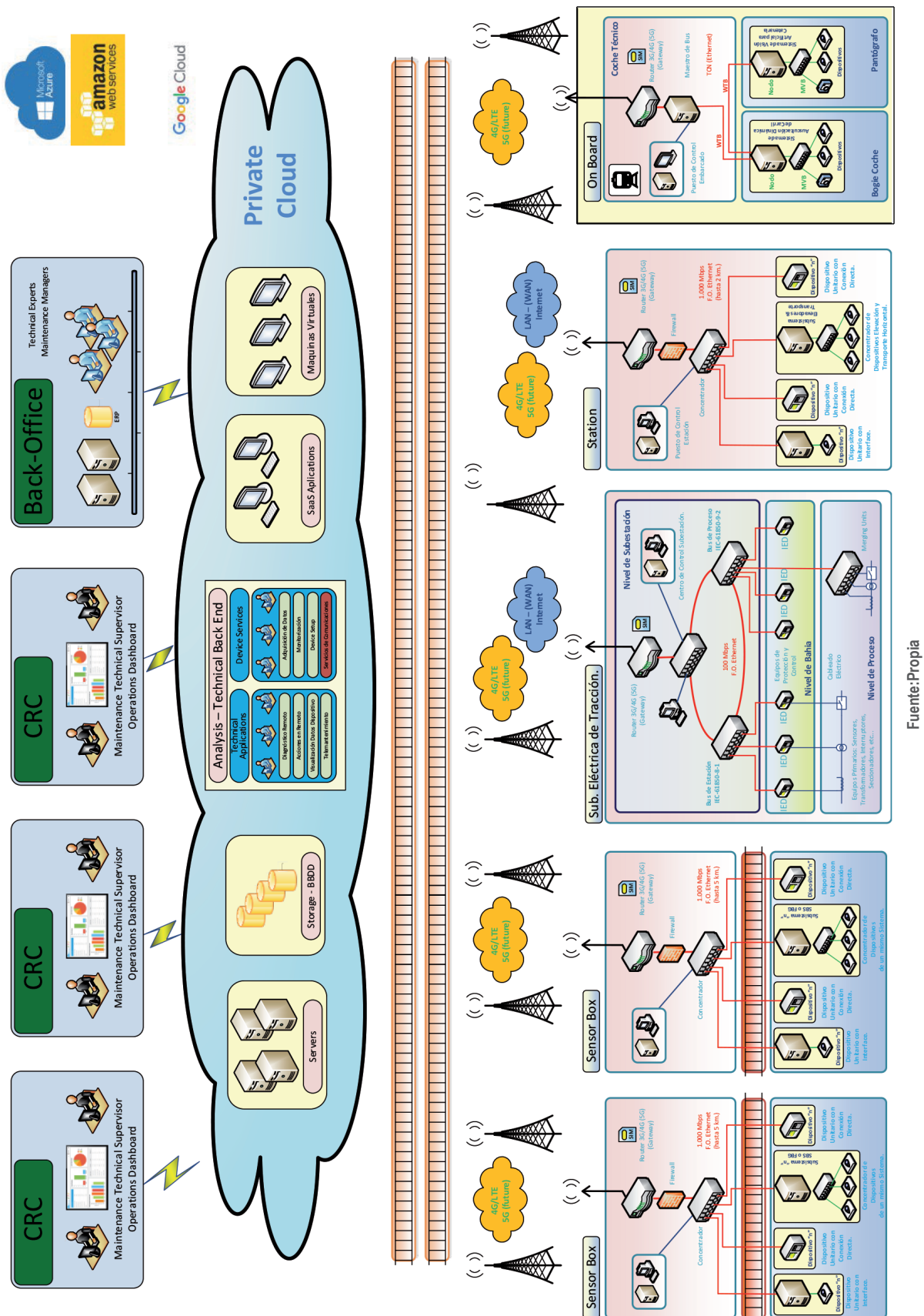
Todos estos dispositivos concentradores de elementos, requieren de una conexión segura a la nube, donde enviar toda información cuanto se recoge (diagnóstico, medición, etc...), y poder recibir aquella información que precisan para su correcto actuación, en caso de que fuera necesario, por lo que la arquitectura permitirá la comunicación bidireccional entre los dispositivos y la nube.

Los diferentes y múltiples activos que soportamos, ya quedaron detallados en los apartados anteriores. Todos ellos, no precisarán de dispositivos adicionales que no sean de adaptación de interfaces, por lo que la información será enviada/recibida de forma directa desde la nube mediante el uso de las comunicaciones móviles (3G o 4G/LTE en la actualidad, 5G en un futuro).

Para establecer la comunicación entre los diferentes nodos o redes locales con “la nube”, se realizará mediante el uso de la infraestructura de red M2M que pueda prestar cualquier operador de comunicaciones móviles, conectando todos y cada uno de los equipos descentralizados por la infraestructura a internet, mediante el uso de dispositivos SIM card. El administrador ferroviario, contratará los servicios de un operador de comunicaciones y la retribución estará conforme al consumo de datos establecido entre ambas compañías.

Una vez en la nube, los datos son almacenados y analizados para crear acciones a considerar (gestión de activos y alertas). Las alertas que se generan en la nube, se pasan a través de un servidor (TB) para generar las órdenes de actuación.

Figura 22. Arquitectura General de Comunicaciones.



Fuente: Propia

5. Conclusiones y Nuevos desarrollos.

Es importante considerar que la disponibilidad de una línea ferroviaria aumentará en la medida que las averías e incidencias de sus elementos e instalaciones disminuyan de una forma sustancial en el tiempo. Para lograr lo anterior, resulta indispensable contar con la estrategia de mantenimiento más apropiada y con el personal capacitado tanto en el uso de las técnicas de análisis y diagnóstico de averías como también con conocimiento suficiente sobre las características de diseño y funcionamiento de las máquinas.

En los próximos años, en el sector del ferrocarril se abrirán continuamente nuevas posibilidades técnicas para recopilar y almacenar datos, así como nuevos campos de investigación y uso como el que se propone. Con las posibilidades que ofrece la digitalización, aumentan las exigencias en cuanto al procesamiento y almacenamiento de datos en el sector del ferrocarril. El uso de aplicaciones en la nube, cobra cada vez más importancia ya que las mismas son muy apropiadas para la conservación y disponibilidad constante de los datos.

La validez de los datos medidos y, con ello, su fiabilidad es especialmente importante para el administrador de la infraestructura. A la hora de adoptar medidas y tomar decisiones se alcanzará el límite de las posibilidades digitales, por lo que en ocasiones, las medidas son y seguirán siendo analógicas. Una cosa es supervisar los sistemas de la infraestructura de manera óptima y basándose en datos, y otra cosa muy diferente es tomar decisiones sobre medidas y aplicarlas.(21)

La digitalización agilizará el cambio en el sector ferroviario. En la actualidad, ya hay muchos ejemplos de ello. La gestión de datos basada en la nube ya se usa en diferentes sectores y aumentará aún más el potencial por medio del almacenamiento de datos masivos, el aprendizaje automático o la computación cognitiva. (22)

La creación de una solución integral que aúne los beneficios del Internet de las Cosas (IoT), conectividad, análisis y otras tecnologías digitales con el fin de optimizar la eficiencia operativa de las instalaciones y sistemas ferroviarios, será una solución que colocará a los administradores ferroviarios en la posición correcta de cara al nuevo paradigma o nueva revolución 4.0.

La cuarta revolución industrial promete aumentos de productividad y nuevas oportunidades de crecimiento para una gran variedad de sectores, en los que sin lugar a duda, se encuentra el sector ferroviario. Los beneficios de la tecnología 5G, serán aún más determinantes para que este tipo de soluciones lleguen a ver la luz, como así lo esperamos.

6. Bibliografía.

1. GARCÍA MÁRQUEZ, Fausto P. Coste Del Ciclo De Vida En Elementos De La Infraestructura Ferroviaria. , 7 y 8 de Septiembre de 2.006, 2.006.
2. CRUZ VEGA, Mario, et al. Las Tecnologías IoT Dentro De La Industria Conectada 4.0. . Fundación EOI. ed., 2.015.
3. ÁLVAREZ LAVERDE, Humberto. El Mantenimiento Para La Era De La Industria 4.0, 2.016.
4. ADIF. Líneas Convencionales - Áreas Técnicas - Infraestructura. , 2.017Available from:<http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/lineas_convencionales/areas_tecnicas/infraestructura.shtml>.
5. Indra. Spatial Data Infrastructure Corporate Platform. . Indracompany.com ed., , 2.013.
6. Geofísica Consultores. Técnicas Geofísicas: Técnicas Sísmicas, Eléctricas y Geo-Radar 3D. Available from: <<http://www.geofisica-consultores.es/es/index.html>>.
7. Geónica. Tomografía Eléctrica Multielectrodo. , 2.017Available from:<<http://www.geonica.com/prod/140/222/Equipos-GEOFISICA-/Tomografia-Electrica-Multielectrodo/index.html>>.

8. Álava Ingenieros. Medida Con Fibra Óptica. © 2017 Álava Ingenieros. , 2.017Available from:<<http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/imagen-y-fotonica/fotonica/instrumentacion-optica-y-electronica/medida-con-fibra-optica/>>.
9. Prosutec. Equipos De Medición y Control. Sistemas De Medición e Inspección. © 2017 Prosutec. , 2.017Available from: <<http://www.prosutec.com/productos.php>>.
10. Frauscher. Frauscher-Sensor Technology. © 2017 Frauscher., 2.017Available from: <<https://www.frauscher.com/es/inicio/>>.
11. ABAD, Silvia; and LOZANO, José Luis. Sensores De Fibra Óptica Para Medidas En Continuo y Monitorización De Estructuras. e-medida. Revista Española de Metrología. ed., 2.016.
12. Option. Connect Virtually Anything to our CloudGate Gateway. Connectivity and on-Board Processing Power. ©2017 Option. , 2.017Available from:<<http://www.option.com/#secondPage>>.
13. DEL RIO GARCÍA, Patricia. Hacia Las Subestaciones IEC 61850, Un Reto Actual Para Las Compañías Eléctricas. SmartGridInfo.es (Tecma Red S.L.) ed., 29.11.2016, 2.016.
14. GARCÍA, María T.; PERRINO, Francisco and RUIZ, Pedro L. Chivatos En La Vía. iTransporte - INECO ed. , 2.016.
15. GARCIA RUIZ, Mariano. MUGISF - Apuntes De Mantenimiento De Los Sistemas De Comunicaciones. . GARCÍA RUIZ, Mariano ed., Apuntes ed. Madrid: Universidad Europea de Madrid (UEM), Mayo 2.014.
16. Unión Internacional de Telecomunicaciones, UIT-T. Serie L: Construcción, Instalación y Protección De Los Cables y Otros Elementos De Planta Exterior. Mantenimiento De Redes De Cable De Fibra Óptica. . UIT-T: Unión Internacional de Telecomunicaciones. ed., 1.996.
17. GUERRERO, Belén. Las Estaciones Del Futuro: La Revolución Digital. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Ed. Vía Libre, Octubre 2.017, 2.017.
18. Expansión. Adif Reduce El Coste De Mantenimiento De Las Líneas De AVE Un 14%. Expansión ed. © 2017 Unidad Editorial Información Económica S.L., 22-11-2.015, 2.015.
19. PALAO, María d. C. Cuánto Cuesta Un Kilómetro De Alta Velocidad. Revista Líneas. Nº 59. ed. ADIF, 2.013. ISBN M-9859-2006.
20. BRAIS VILA, Araico. ALTRAN 360. El Blog De Innovación y Tecnología De Altran España. Plataforma De Mantenimiento Basado En Condición CBM De Material Rodante. ALTRAN360: 10 de Febrero de 2.016, 2.016Available from:<<http://blog.altran.es/industria-energia/mantenimiento-basado-en-condicion-cbm/>>.
21. MARSCHNIG, Stefan. Ferrocarril: Digital En Analógico. FRAUSCHER - Sensor Technology ed., 2.017, vol. 01.2017 - Ultimate Rail. pp. 7.
22. LUGSCHITZ, Stefan. Como Se Comunican Los Sistemas. FRAUSCHER - Sensor Technology ed., 2.017, vol. 01.2017 - Ultimate Rail. pp. 12.
23. JUAN, Anabalón R. Internet of Threats (IoT): Una Visión De La Arquitectura, Aplicaciones, Riesgos y Desafíos Futuros.
24. CAÑAS ESTEVEZ, Jorge. Seguridad En El Contexto Del Internet De Las Cosas IoT y Los Dispositivos Wearables. Trabajo, Auditoría, Calidad y Seguridad. 3 De Mayo De 2.016, 2.016.
25. RODRIGUEZ-MORCILLO GARCÍA, Carlos; ALEXANDRES FERNANDEZ, Sadot and MUÑOZ FRIAS, José Daniel. Análisis Del Estándar De Comunicaciones TCN (Train Communication Network). Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad Pontificia de Comillas (ICAI). ed., 9 de Febrero de 2.016, 2.016.