

La digitalización del ferrocarril

The Railway Digitalization

Ignacio Jorge Iglesias Díaz^{1*}, Ricardo Campo Cascallana², José Estaire Gepp³

Resumen

El término “Digitalización” es un término muy utilizado en la actualidad como motor del desarrollo futuro, pero es un término muy genérico en el que se pueden englobar multitud de desarrollos y tecnologías, algunos de ellos desarrollados hace décadas. Este artículo presenta una visión de lo que los autores entienden como “digitalización del ferrocarril”, y que engloba una serie de desarrollos que permitirán la implantación de tecnologías digitales en este sistema de transporte. El ferrocarril, si bien es el sistema de transporte más seguro y más eficiente energéticamente, también se caracteriza por ser un sistema muy conservador con resistencia a la introducción de nuevas tecnologías. Pero actualmente, si se quiere adaptar el ferrocarril a los nuevos tiempos, es urgente la implantación de tecnologías totalmente digitales, abandonando ya los viejos sistemas analógicos presentes aún en muchos sistemas ferroviarios europeos, y así lo recoge el programa europeo de investigación ferroviaria Shift2 Rail y la continuación del mismo para el periodo 2020-2027. En este artículo se presentan las líneas más avanzadas de tecnologías digitales que se están aplicando o se aplicaran en un plazo corto al ámbito ferroviario y que supondrán un impulso del mismo en términos de incremento de la seguridad y de prestaciones relativas a la reducción de los costes de mantenimiento, explotación y aumento de la capacidad.

Palabras clave: digitalización, ERTMS, cantón móvil, FRMCS, gemelos digitales, ATO, Galileo, GNSS.

Abstract

The term “digitalization” is currently widely used as a driver for future developments. Nonetheless, it’s a very generic term that covers many different areas and technologies, some of which were developed some decades ago. This paper presents a vision of what the authors understand as the “railways digitalization”, consisting of a series of developments that will allow the introduction of digital technologies in this system of transport. Railways, being the safest and most energy-efficient transport system, is also very conservative and reluctant to the introduction of new technologies. Today, it’s really urgent the setting up of digital technologies to adapt railways to the new times. Now, it’s the time to replace old analogic systems still in operation in some European railways. This is clearly included in the European Railways Research Program “Shift2Rail”, and in its future continuation Shift2Rail2 for the period 2020-2027. In addition, this paper shows the most advanced digital technologies already applied or to be applied in the near future to the railways. These technologies will imply a strong impulse to the railways in terms of: safety improvement, maintenance and operation cost reduction, and capacity increase.

Keywords: digitalization, ERTMS, moving block, FRMCS, digital twins, ATO, Galileo, GNSS.

INTRODUCCIÓN

El concepto de digitalización es actualmente, junto al de transición ecológica, uno de los conceptos más utilizados para vertebrar el proceso de avance de la sociedad hacia sistemas modernos que potencien la economía de forma más sostenible. Sin embargo, si la digitalización significa la utilización de sistemas digitales, este es un proceso ya iniciado hace varias décadas cuando los microprocesadores y los sistemas digitales empezaron con procesos de automatización industriales que han avanzado de forma muy significativa y que no constituyen ninguna novedad.

No obstante, si hay campos donde la digitalización, en el sentido de aplicación de tecnologías digitales, tiene un recorrido importante de aplicación y producirá cambios muy relevantes en los próximos años. Son campos donde bien por su complejidad o bien por actitudes conservadoras, los sistemas digitales no han tenido un despliegue importante, y ahora, con la aparición de nuevas tecnologías con más prestaciones y como impulso a la economía en tiempos de crisis, pueden comenzar a desplegarse de forma masiva.

El transporte es uno de estos campos donde existe un gran recorrido para la aplicación de sistemas digitales. Uno de los ejemplos más claros es el transporte por carretera donde día a día se evoluciona en los sistemas de conducción automática, a pesar de las dificultades técnicas que se derivan de un sistema tan abierto y lleno de aleatoriedades como el transporte rodado por carretera.

Sin embargo, el ferrocarril, por sus características de sistema guiado y totalmente controlado por los sistemas de control de tráfico actuales, sí se presta de forma palmaria a la aplicación de sistemas digitales que le doten de prestaciones aún no alcanzadas y que faciliten la mejora

* Autor de contacto: jorge.iglesias@cedex.es

¹ Doctor Ingeniero Naval por la Universidad Politécnica de Madrid. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

² Ingeniero Industrial por la Universidad de León. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

³ Doctor Ingeniero de Caminos por la Universidad Politécnica de Madrid. Laboratorio de Geotecnia (LG), del CEDEX.

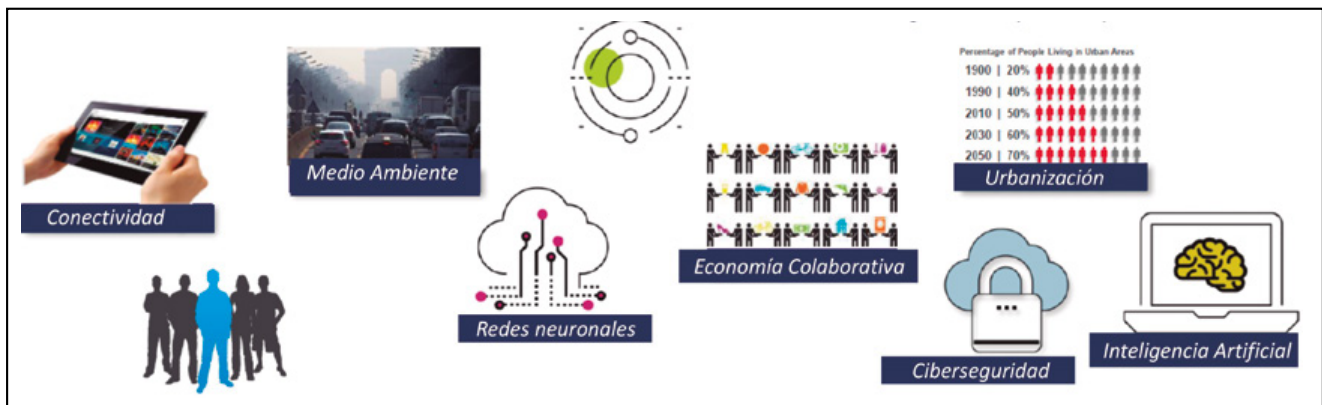


Figura 1. Áreas que demandan la digitalización del ferrocarril.

sustancial de este tipo de transporte. En efecto, los sistemas digitales aplicados al ferrocarril pueden permitir una disminución sustancial de los costes de mantenimiento y explotación, así como una mejora de su seguridad, capacidad, prestaciones al cliente y puntualidad.

Tradicionalmente el ferrocarril se ha caracterizado por sus altos niveles de seguridad, pero también por una actitud altamente conservadora en la introducción de nuevas tecnologías, justificada generalmente por el hecho de que estas nuevas tecnologías podían afectar a dicha seguridad. Pero nada más lejos de la realidad, porque los sistemas digitales garantizan unos niveles de seguridad muy superiores a los antiguos sistemas analógicos y por tanto es tiempo de romper la creencia de que la seguridad se basa en la experiencia y en la sencillez y abrir la mente a la aceptación de sistemas digitales, que si bien más complejos, pueden garantizar con criterios científicos unos niveles muy superiores de seguridad.

En este artículo se presenta el punto de vista de los autores en aspectos muy relevantes de la digitalización del ferrocarril, como los siguientes:

- Digitalización de los elementos de la infraestructura ferroviaria y su introducción en grandes bases de datos donde la aplicación de técnicas de *Big Data* o Inteligencia Artificial pueden reducir de forma drástica los costes de mantenimiento.
- Introducción de sistemas de control de tráfico digitales con un incremento sustancial, por un lado, de los niveles de seguridad con respecto a los sistemas analógicos, y por otro, de nuevas prestaciones como cantón móvil y aumento de la capacidad y/o conducción automática y autónoma del tren.
- Introducción de sistemas de comunicaciones basados en las más modernas tecnologías como el 5G, tanto para mejorar las prestaciones del sistema de control de tráfico como para los servicios al viajero.
- Introducción de la tecnología de navegación por satélite y más concretamente del sistema europeo de Galileo, para reducción de costes de explotación y aumento de las prestaciones del sistema de control de tráfico.
- Desarrollo de “gemelos digitales” que permitan la ejecución en laboratorio de pruebas que actualmente se ejecutan en vía y que retrasan los procesos de puesta en servicio, así como de modelos digitales, por ejemplo de comportamiento de la infraes-

tructura que permiten mejora del diseño inicial o la implantación real de sistemas de mantenimiento predictivo y preventivo.

El Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF) y el Laboratorio de Geotecnia (LG), del CEDEX, están trabajando de forma activa en proyectos nacionales y europeos en los ámbitos antes señalados, y este artículo constituye una muestra de dichas actividades.

Tal y como señaló el director general de la DG MOVE de la Comisión Europea, Henrik Hololei, en los *Digital Transport Days* celebrados el 7 de octubre de 2019, “El transporte necesita cubrir la demanda creciente de movilidad de una manera sostenible y ayudar a Europa a conseguir los ambiciosos objetivos. El ferrocarril es, de largo, el modo de transporte que deberá jugar un papel más importante”, señalando la necesidad de aplicar todas las modernas tecnologías que se muestran en la figura 1 a la transformación digital del ferrocarril.

1. ¿QUÉ ES LA DIGITALIZACIÓN DEL FERROCARRIL?

Una definición de la digitalización del ferrocarril sería la utilización de modernas técnicas digitales para todas aquellas tecnologías que constituyen el ámbito ferroviario.

En primer lugar, el sistema de control del tráfico ferroviario que, aunque parezca increíble a día de hoy está constituido por antiguos sistemas analógicos en muchos países de la Unión Europea; sistemas analógicos con unos niveles de supervisión y por tanto de seguridad muy por debajo de los estándares requeridos en la actualidad. En segundo lugar, la simulación por elementos finitos de los comportamientos estructurales de la plataforma y la catenaria, así como la utilización de grandes bases de datos para contener todos los elementos de la infraestructura, bases de datos a las que se pueden aplicar algoritmos de inteligencia artificial y de *machine learning* para optimizar los procesos de mantenimiento y conservación de la infraestructura ferroviaria. En tercer lugar, las simulaciones en laboratorio mediante los denominados “gemelos digitales” de los sistemas de señalización y control del tráfico. En cuarto lugar, un aspecto crítico como las comunicaciones basadas en 5G y la ciberseguridad. Para finalizar, en quinto lugar, con la utilización de los sistemas de localización por satélite, que sin demora, deben ser introducidos en el sistema ferroviario.

Todo esto sin dejar de lado la aplicación en el futuro de cuantas técnicas digitales vayan desarrollándose, pero lo que es una realidad a día de hoy es que hay un retraso en el mundo ferroviario con respecto a otros sistemas de transporte como por ejemplo, la aviación donde la seguridad, al igual que en el ferrocarril, es un factor primordial. Es por tanto el momento adecuado para potenciar estas tecnologías y el programa europeo de investigación ferroviaria, comúnmente denominado *Shift2Rail 2* que se está gestando en la actualidad señala en su documento base [1], la aplicación de tecnologías digitales como uno de los vectores básicos del desarrollo futuro del ferrocarril, ya que los sistemas analógicos no permiten una adaptación flexible a las nuevas tecnologías que demanda el ferrocarril.

La asociación europea de fabricantes ferroviarios UNIFE ha señalado en su documento *Digital Trends in the Rail Sector*, publicado en abril de 2019 [2], que las transformaciones digitales deberán contribuir a conseguir los objetivos del sector ferroviario europeo tanto en la mejora de la experiencia del pasajero como en la optimización de las cadenas logísticas, mediante la aplicación de las siguientes tecnologías digitales: *Big Data*, Ciberseguridad, Inteligencia Artificial, Nuevos Servicios de Movilidad y Digitalización de los Servicios Logísticos de Mercancías.

En este artículo no se tratarán grandes áreas en lo relativo a la digitalización del ferrocarril, sino que se abordarán aspectos muy concretos de la misma, con la descripción técnica de aquellos aspectos en los que está trabajando el CEDEX relativos a sistemas digitales ferroviarios.

2. LA DIGITALIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

La creciente demanda de mejoras en los procesos de supervisión, control y monitorización en tiempo real del ferrocarril requiere de un salto hacia la digitalización de la infraestructura con el objetivo de mejorar la gestión y la eficiencia, reducir costes operativos y mejorar su competitividad respecto a otros modos de transporte.

El constante desarrollo de nuevas soluciones digitales supone un marco de nuevas oportunidades para los Administradores de Infraestructuras y su aplicación en distintos ámbitos, como la aplicación de modelos de tratamiento digital específicos de la infraestructura ferroviaria, sistemas de mejora en la gestión de activos, implantación de técnicas avanzadas de mantenimiento predictivo, ciberseguridad y protección de las redes de infraestructura ferroviarias o las sinergias entre distintos países mediante el uso compartido de datos y experiencia.

Dentro de los objetivos de la digitalización de la infraestructura ferroviaria se encuentra el desarrollo de sistemas de análisis automático a través de sistemas de mapeo móvil para la inspección, supervisión e inventariado de los elementos de los que se componen las vías ferroviarias.

El mapeo móvil es una tecnología emergente que basa su principio en la captación de datos con sensores modulares de distinta naturaleza para la obtención de la trayectoria seguida por el vehículo con gran exactitud y la generación de un mapa digital de alto detalle de la línea a las velocidades comerciales de circulación de los trenes.

Los factores diferenciales entre las soluciones de mapeo móvil están relacionados con la definición de las

condiciones del entorno (vías interurbanas, urbanas, túneles) y la precisión, siendo esencial su definición en la elección de los sensores así como en los algoritmos de hibridación de las distintas tecnologías.

La trayectoria del tren se obtiene a través de equipos de posicionamiento satelital del tipo multi-constelación (Galileo, GPS, GLONASS y/o BeiDou), multi-frecuencia (E1/E5 en Galileo o L1/ L5 en GPS), con servicios de aumentación como SBAS (precisión de metro) y RTK/PPK (precisiones de cm) combinados con unidades de medición inercial (IMU) formados por acelerómetros, giroscopios, magnetómetros y sensores de temperatura.

En cuanto a la obtención de los mapas digitales de la vía y los elementos asociados a ella, las nubes de puntos se pueden obtener de forma directa, indirecta o mediante la combinación de tecnologías: 1) Obtención directa mediante la emisión de haces de rayos láser (tecnología LiDAR) que, conociendo la dirección en la que el rayo fue emitido y el tiempo invertido desde la emisión a la detección del reflejo, permite calcular la distancia real existente entre el sistema de medida y el objeto. La repetición de este proceso miles de veces por segundo da como resultado la generación directa de una nube de puntos monocromática muy densa. 2) Obtención mediante procesado de múltiples imágenes bidimensionales que alineadas y sincronizadas con la trayectoria del tren permiten una reconstrucción tridimensional del recorrido del tren. Adicionalmente, cabe destacar que este sistema basado en imágenes requiere de buenas condiciones de luz y visibilidad. 3) La combinación de ambas tecnologías (LiDAR + Cámaras) da como resultado la obtención de nubes de puntos con color (RGB) en cada vértice, así como mejoras en la precisión mediante modelos de corrección de errores, menor dependencia de las condiciones de luz y visibilidad, escaneado de superficies homogéneas como nieve o arena y capacidad de incursión en vegetación.

Otra de las ventajas de estos sistemas modulares es que permiten la sincronización de registros con otras tecnologías de aplicación a la infraestructura ferroviaria, como sistemas de inspección de los elementos de vía (sistemas láser, ultrasonidos o sensores de dispersión del flujo magnético), cámaras termográficas para detectar focos de humedad en túneles y otros equipos de auscultación de la infraestructura.

Las figuras 2 (a y b) muestran las imágenes obtenidas mediante la técnica 2) de procesado múltiple de



Figura 2a. Reconstrucción por nubes de puntos mediante procesado de imágenes en la línea Almorchón-Alhondiguilla en zona de trinchera.



Figura 2b. Reconstrucción por nubes de puntos mediante procesamiento de imágenes en la línea Almorchón-Alhondiguilla en el ámbito de la estación de Espiel.

imágenes bidimensionales que dan como resultado nubes de puntos georreferenciadas, obtenidas por el LIF en la campaña de medidas desarrolladas en la línea Almorchón-Alhondiguilla dentro del proyecto europeo ER-SAT. Se puede navegar por la reconstrucción completa de dichas imágenes en los enlaces que se detallan en [6] y [7].

La figura 3 muestra una imagen obtenida mediante la tecnología 1) LiDAR de emisión de haces de rayos láser, que si bien de muy alta precisión, requiere la utilización de equipos láser con un coste muy superior al de las cámaras requeridas en la tecnología 2) de procesamiento múltiple de imágenes mostrado en la figura 2.



Figura 3. Reconstrucción por nubes de puntos mediante tecnología LiDAR (Fuente: TrimbleMX9).

3. LOS SISTEMAS DE MANDO Y CONTROL DE TRÁFICO DIGITALES. EL ERTMS

El ERTMS (*European Rail Traffic Management System*) es el sistema definido por las autoridades europeas a través de la Agencia Ferroviaria Europea (ERA) para sustituir a los múltiples sistemas nacionales (alrededor de 25 sistemas) aún en operación en los diferentes países de la Unión Europea. A diferencia de muchos de los antiguos sistemas, el ERTMS es un sistema completamente digital, tanto en la transmisión tren-vía como en el procesamiento de datos, que proporciona una supervisión continua del movimiento del tren a lo largo de todo su recorrido.

La figura 4 muestra de forma resumida los principales componentes del ERTMS, que son los siguientes: 1) Un subsistema embarcado que con la información recibida de la vía (bien a través de baliza en nivel 1 o a través de radio desde el RBC en nivel 2) supervisa y controla el movimiento del tren de forma segura, asegurando la distancia

recorrida y la velocidad en cualquier punto del trayecto; y 2), Un subsistema de vía que en base a la circulación de trenes en el tramo envía una autorización de movimiento al tren por baliza o por radio, así como todos los datos que el equipo embarcado precisa, como gradiente de la vía y cuadro de velocidades máximas, para una supervisión continua y segura del movimiento del tren.

El ERTMS presenta un nivel de seguridad SIL4 (*Safety Integrity Level 4*) que significa una tasa de fallos de 10^{-9} fallos por hora, esto es, un fallo de seguridad cada 114 años. Los sistemas analógicos en servicio aún existentes en España son los sistemas ASFA y ASFA Digital (en el que paradójicamente, a pesar de su nombre, la transmisión vía tren es todavía analógica limitando de esta manera la supervisión continua del movimiento del tren). La supervisión de velocidad en estos sistemas no es continua sino puntual, descansando por tanto en gran parte del trayecto en el maquinista, cuya tasa de fallos es según los estudios del factor humano de 10^{-3} (un fallo cada mil horas); por tanto estos

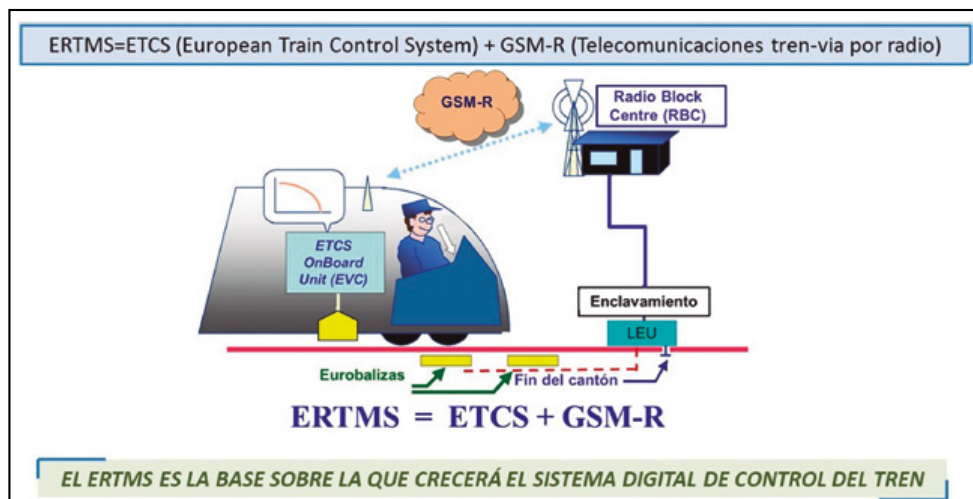


Figura 4. Principales componentes del ERTMS.

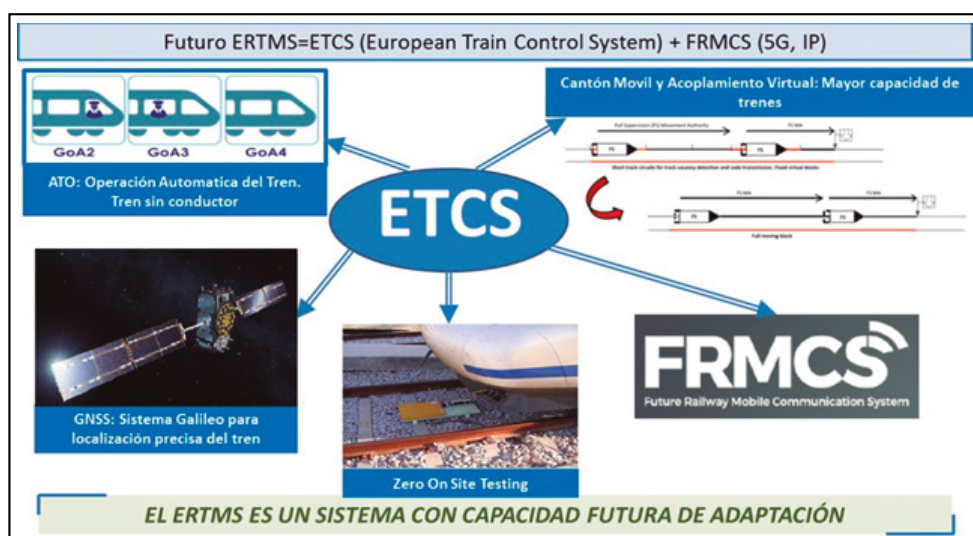


Figura 5. El ERTMS como columna vertebral de la Digitalización del Sistema de Mando y Control Ferroviario (Fuente: UIC y European GNSS Agency).

sistemas analógicos presentan un nivel de seguridad un millón de veces inferior al ERTMS.

El hecho de que el sistema ERTMS sea un sistema totalmente digital y abierto (especificaciones públicas) le dota de la capacidad de ser un sistema en el que se pueden ir integrando paulatinamente nuevas funcionalidades compatibles con las ya existentes. Esto resulta en que las funcionalidades que constituyen la base de la digitalización de los sistemas de control de tráfico futuros, como el ATO (*Automatic Train Operation*), el cantón móvil, los sistemas de telecomunicaciones futuros (FRMCS basado en el 5G) o el Galileo, ya están contemplados y desarrollándose en el ámbito del ERTMS (figura 5). Es por eso que muchos expertos han coincidido en señalar al **ERTMS como la columna vertebral o “backbone” de la digitalización del ferrocarril**.

Sobre los sistemas nacionales analógicos en servicio en España (ASFA y ASFA Digital) resulta imposible la adición de las funcionalidades señaladas en la figura 5, ya que su reducida funcionalidad no permite el despliegue de prestaciones avanzadas.

Por su lado, el ERTMS presenta dos características que lo hacen apto para su crecimiento en base a nuevas tecnologías digitales: en primer lugar, que es un sistema abierto, esto es, con especificaciones abiertas sobre las que se

pueden añadir funcionalidades; y en segundo lugar, que es un sistema totalmente digital y por tanto adaptable a prestaciones avanzadas.

Es por ello que se hace urgente completar en España, y en el resto de Europa, la transición de los antiguos sistemas nacionales propietarios, y en ciertos casos analógicos como en España, por el ERTMS que como columna vertebral del sistema de control y mando ferroviario permitirá el crecimiento del sistema con las nuevas funcionalidades señaladas en la figura 5. El ferrocarril español debe dar este salto para beneficiarse de todas las ventajas que los sistemas digitales proporcionan, y es un salto para el que estamos totalmente preparados ya. El ERTMS en su baseline 3 es un sistema totalmente maduro y con prestaciones más que contrastadas, y España ha sido pionero en el despliegue del ERTMS en su red de alta velocidad, despliegue que debe extenderse lo antes posible a la red convencional y de cercanías.

3.1. La conducción automática y/o autónoma

Una de las funcionalidades más requeridas al ERTMS es la de la conducción automática y/o autónoma de los trenes. A día de hoy el ERTMS es un sistema de Protección Automática del Tren (ATP: *Automatic Train Protection*)

Grado de Automatización	Operación del tren	Puesta en marcha del tren	Conducción y parada del tren	Cierre de puertas	Operación en caso de incidencia
GoA1	ATP con maquinista	Maquinista	Maquinista	Maquinista	Maquinista
GoA2	ATP y ATO con maquinista	Maquinista / Automática	Automática	Maquinista	Maquinista
GoA3	Sin maquinista (DTO)	Automática	Automática	Atendida / Automática	Atendida
GoA4	Desatendida (UTO)	Automática	Automática	Automática	Automática

Acronimos:
 GoA: Grade of Automation
 ATP: Automatic Train Protection
 ATO: Automatic Train Operation
 DTO: Driverless Train Operation
 UTO: Unattended Train Operation



Figura 6. ATO sobre ERTMS.

que prescribe de forma segura la velocidad máxima a la que puede circular el tren. En muchos de los trenes comerciales hay implantada ya una funcionalidad de seguimiento automático de dicha velocidad en el modo FS (Supervisión Total) del ERTMS, en cuyo caso el maquinista únicamente acciona el botón de hombre muerto. Esta funcionalidad es denominada ATO (Operación Automática del Tren) porque la velocidad la sigue el tren automáticamente, si bien dista de lo que se conoce de forma estricta por ATO, que es una operación automática del tren completa, desde el nivel actual en el ERTMS hasta un nivel completo sin conductor en trenes totalmente automáticos.

Esta conducción sin conductor ya se ha implantado en líneas cerradas como metros y suburbanos, existiendo múltiples ejemplos de trenes desatendidos. En el ferrocarril convencional el sistema presenta muchos más grados de libertad y es, por tanto, más compleja la implantación de sistemas automáticos. Sin embargo, el ERTMS está desarrollando en la actualidad las especificaciones europeas del ATO sobre ERTMS (Subset-125 System Requirements Specifications of ATO over ETCS).

Tal y como se muestra en la figura, 6 el ATO sobre ETCS se está desarrollando en 4 grados de automatización progresivos, desde el actual de un sistema ATP de protección automática del tren con maquinista, hasta el GoA (Grade of Automation) 4 de un tren totalmente desasistido y sin conductor, en el que la puesta en marcha del tren, la conducción y parada del mismo, el cierre de puertas y la gestión de incidencias serán totalmente automáticas.

La funcionalidad del módulo ATO, así como su interfaz con el equipo embarcado ETCS se están definiendo totalmente a nivel europeo, y dichas especificaciones se incluirán en las ETI (Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad) que se publicarán en 2022. Lo que es más urgente para optimizar la operación ferroviaria sobre todo en líneas con mucha densidad de tráfico como las líneas de cercanías es el GoA2 en el que tanto la conducción como la parada del tren se realiza de forma automática, optimizando los tiempos de parada y el *headway* entre trenes.

3.2. Cantón móvil y acoplamiento virtual

Otra de las funcionalidades que se incorporarán al ERTMS en un futuro cercano es la relativa al cantón móvil

con el que se incrementará al máximo la capacidad de las líneas al permitir una mayor frecuencia de trenes. Esto se representa en la figura 7, en la que se muestra la capacidad para los niveles 1, 2 y el futuro nivel 3 del ERTMS.

La capacidad tanto en N1 como en N2 viene determinada por la longitud de los cantones, esto es, de los segmentos de vía en los que el sistema de señalización solo permite la presencia de un tren. Cabe destacar que en el cálculo de los cantones se han de tener en cuenta multitud de factores, como el tipo de explotación, velocidad de circulación, así como las características de los trenes que circulan por la línea con el objetivo de evitar procesos de frenados no deseados en la circulación de trenes.

De una forma simplificada, las siguientes expresiones permiten calcular la frecuencia entre trenes que determina la distancia mínima entre ellos:

$$L_{\text{frenado}} = \frac{V_{\text{max}}^2}{2 \cdot \text{Deceleración}_{\text{max}}}$$

$$L_{\text{entre trenes}} = (L_{\text{frenado}} + V_{\text{max}} \cdot T_{\text{aplic freno}}) \cdot K_{\text{seguridad}} + L_{\text{cantón}}$$

$$T_{\text{entre trenes}} = \frac{L_{\text{entre trenes}}}{V_{\text{max}}}$$

En las líneas españolas de alta velocidad en nivel 1 la longitud de los cantones, que están protegidos por señales luminosas físicas, se establece en el entorno de los 9-11 kms. Aplicando las expresiones definidas anteriormente, para una velocidad máxima de 300 km/h (83,3 m/s), un tiempo de aplicación del freno de 4 s, un coeficiente de seguridad del 25 % y una deceleración de 0,5 m/s², la distancia entre trenes se sitúa en 22.090 m y, por tanto, el tiempo entre ellos será de 265 s, alcanzándose así un intervalo mínimo en el rango de los 5 minutos.

En nivel 2 un cálculo similar para una velocidad máxima de 350 km/h nos lleva a 3 minutos para cantones de 3.000 m y 2,5 minutos para cantones de 1.500 m.

Este cálculo muestra cómo en nivel 2 se puede aumentar la frecuencia disminuyendo la longitud de los cantones, y en su caso mínimo se llegaría al concepto de cantón móvil, que es en el que la distancia entre trenes vendría determinada por la longitud de frenado del tren posterior. Este es el concepto que se aplicará en el futuro nivel 3, donde deberán ser los propios trenes los que reporten su posición al RBC y enclavamiento, que gestiona el tráfico en N2, ya

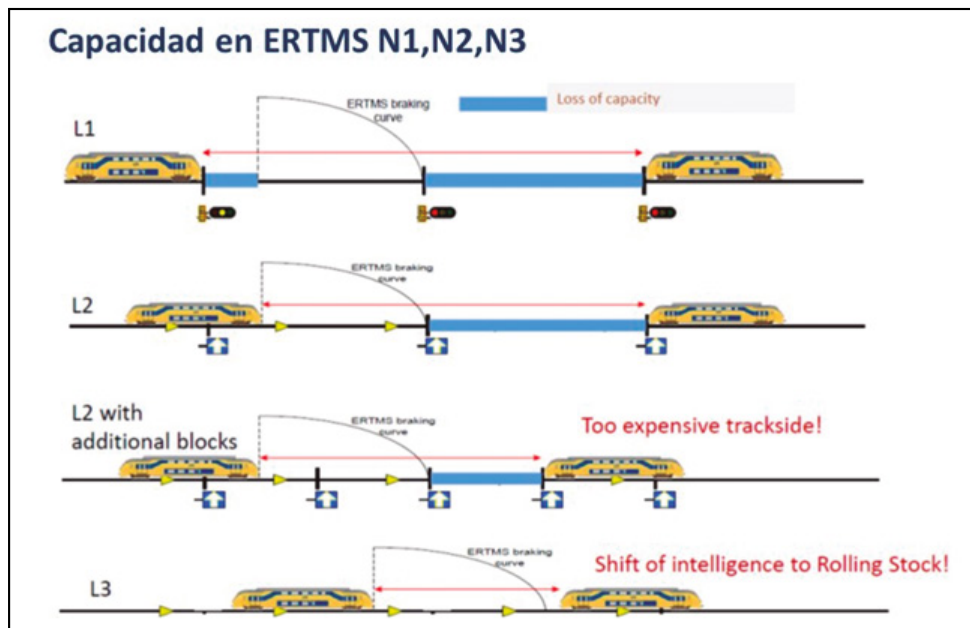


Figura 7. Capacidad en líneas equipadas con los niveles 1, 2, 2 con cantonamiento de alta capacidades menores, y 3 de ERTMS [3].

que en este nivel no existirán circuitos de vía ni contadores de ejes que detecten la presencia del tren en la vía.

Dentro del programa europeo S2R se están también desarrollando proyectos de acoplamiento virtual o “virtual coupling” de trenes, que permitirían reducir la distancia entre convoyes por debajo de la longitud de frenado del tren posterior, mediante un sistema que conectando ambos trenes da orden de frenar al segundo cuando el primero comienza a frenar. Esto es similar al concepto de “platooning” en la carretera, de circulación de muchos vehículos conectados a distancias muy inferiores a las de frenado. En la figura 8 [3] se muestra cómo para el Virtual Coupling no basta con la comunicación entre el vehículo y la infraestructura (V2I) que requiere el N3 del ERTMS, sino que adicionalmente se requiere una comunicación vehículo-vehículo (V2V) que en este caso le da un EoA (fin de la autoridad de movimiento) diferente a la que le proporciona

el N3 y que es la EoA_{VC} asegurando que el tren B no se detiene en ese punto, sino que alcanza la misma velocidad que el tren A.

3.3. Los nuevos sistemas de comunicaciones ferroviarias

El GSM-R (*Global System for Mobile Communications-Railway*) es el exitoso sistema digital que se utiliza actualmente en los ferrocarriles de todo el mundo. Tiene capacidad para dar respuesta a las necesidades de la operación ferroviaria, tanto en los canales de voz para comunicar el puesto de mando con los maquinistas y también con los operarios de vía, como en los canales de datos para servir de canal de comunicación entre el RBC (*Radio Block Center*) y el equipo embarcado ERTMS en la operación en nivel 2.

Este sistema utiliza frecuencias dedicadas al ferrocarril en la banda de los 900 MHz y puede utilizar los modos de operación de conmutación de circuitos (*Circuit Switching*) o de paquetes (*Packet Switching* o GPRS), permitiendo llamadas de grupo y de emergencia que en cuestión de segundos alertan a todos los trenes que se dirijan a un punto de peligro. Sin embargo, y a pesar de sus buenas prestaciones, la tecnología del GSM-R está cercana a la obsolescencia por la rapidez con la que evolucionan las tecnologías de telecomunicaciones que, no es en absoluto, paralela a la evolución del ferrocarril. Los suministradores de GSM-R se han comprometido al mantenimiento del mismo hasta 2030 y en consecuencia es necesario reemplazarlo de forma totalmente interoperable por un nuevo sistema, un asunto de gran importancia en Europa donde hay más de 100.000 kms de líneas equipadas con el GSM-R.

El desarrollo del sistema sucesor del GSM-R fue iniciado por la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles) en 2014. Se trata del sistema denominado por las siglas FRMCS (*Future Railway Mobile Communication System*). Se trata de un sistema que deberá dar respuesta a las prestaciones solicitadas que se muestran en la figura 9 [4].

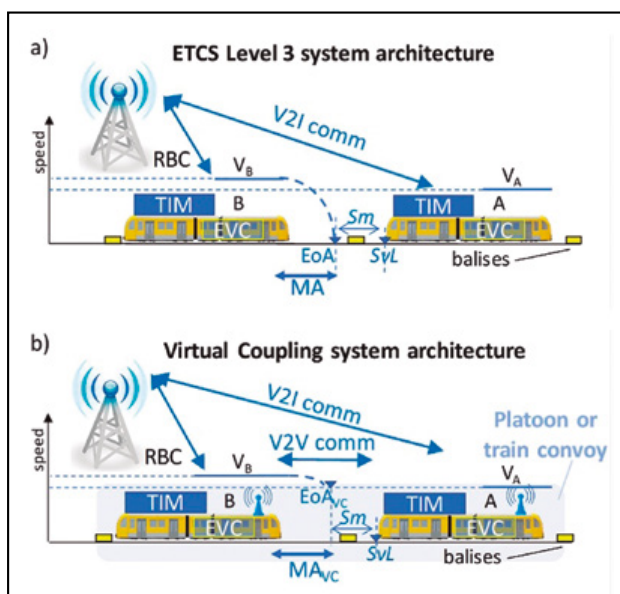


Figura 8. Arquitectura esquemática del sistema: a) ERTMS nivel 3, y b) Acoplamiento Virtual [3].

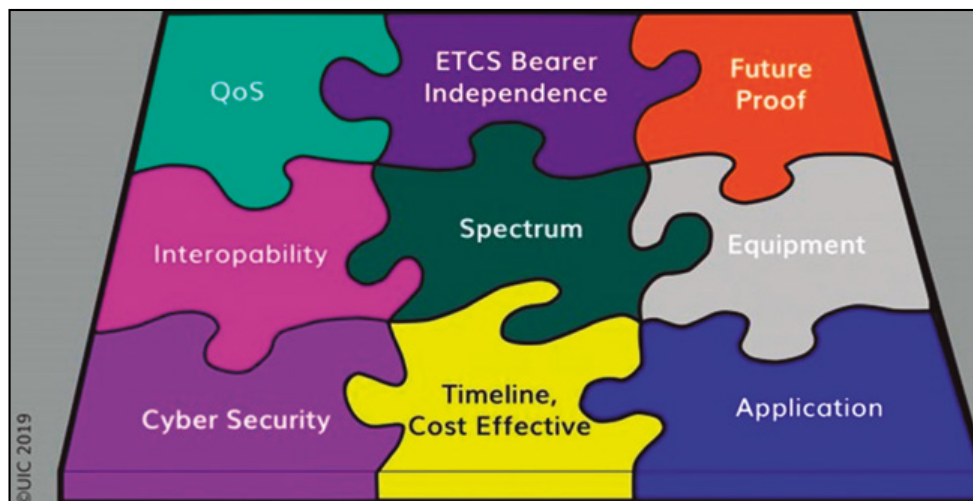


Figura 9. Prestaciones requeridas al FRMCS (Fuente: UIC).

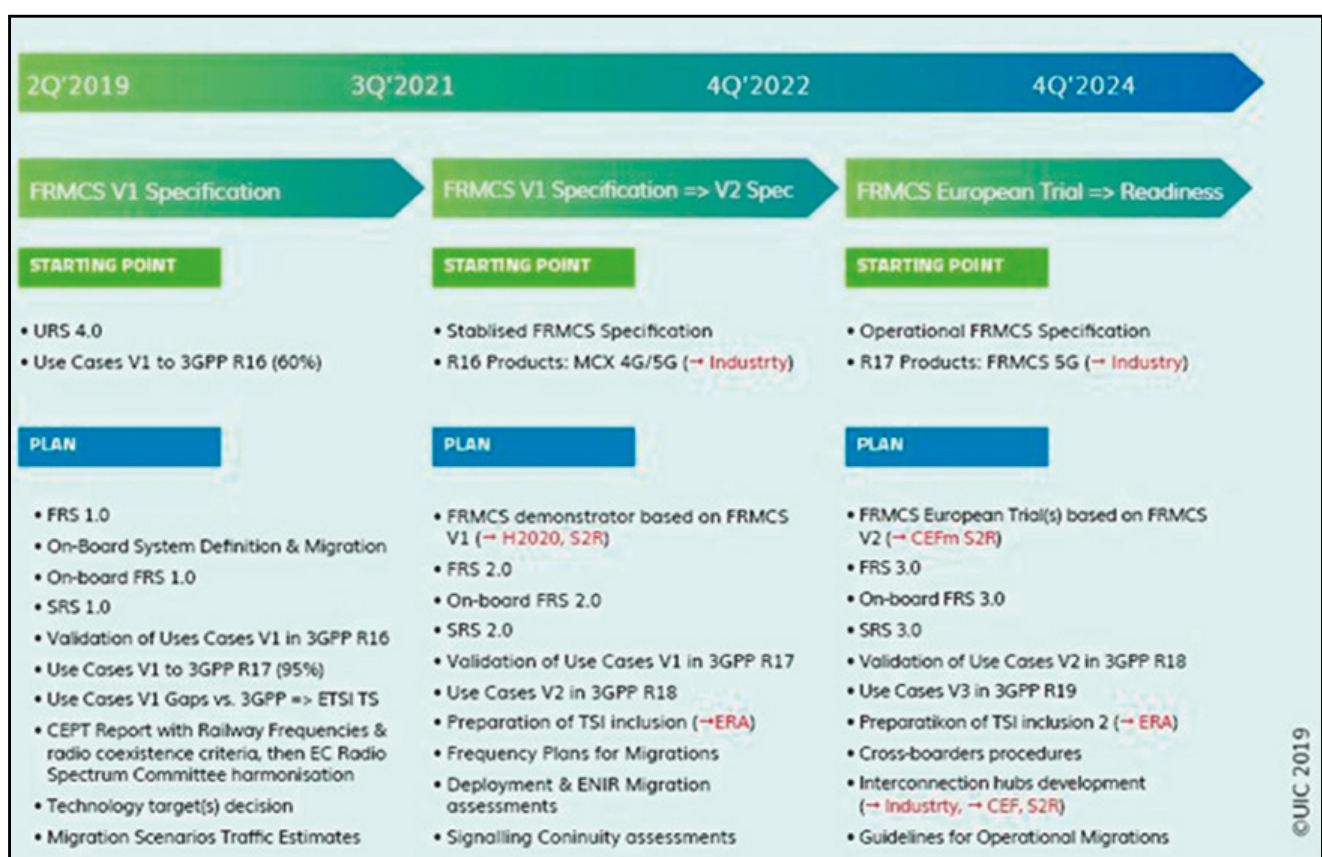


Figura 10. Calendario de desarrollo del FRMCS (Fuente: UIC).

Estas prestaciones se resumen en las siguientes: Requisitos de alta Calidad de Servicio, asegurar la interoperabilidad en Europa para cruzar fronteras, mitigación de los retos de ciberseguridad, definición de las bandas de frecuencia que asegure la coexistencia con el GSM-R para la migración entre ambos, coste asumible y duración futura. También es imprescindible que el concepto de sistema portador independiente del ERTMS (*ETCS bearer independence*) garantice que una vez en el modo de conmutación de paquetes, el cambio del sistema de radio acorde a la evolución de las tecnologías sea totalmente independiente y, por tanto, no afecte al ERTMS tanto en vía como embarcado.

El trabajo de estandarización del grupo de trabajo comandado por la UIC está trabajando en las siguientes direcciones: 1) Requisitos de Usuario, 2) Arquitectura del Sistema, 3) Especificación de Requisitos Funcionales, y

4) Necesidades de espectro de frecuencia. Los dos primeros puntos ya han sido finalizados y trasladados al Comité Técnico de Comunicaciones Ferroviarias (CT-RT) de la Organización Europea de Estandarización de las Telecomunicaciones (ETSI) para su proceso de estandarización.

Como el FRMCS se va a basar en la tecnología **3GPP** (Proyecto Asociación de Tercera Generación) **5G**, una de las actividades más importantes ha sido incluir las prestaciones requeridas para el ferrocarril en la normativa del **3GPP-5G**, llevada a cabo por la ETSI TC-RT. En lo relativo a las bandas de frecuencia, el proceso de definición de las mismas está en marcha. Se espera que para el FRMCS se utilizarán de forma armonizada bandas de frecuencia en los entornos de los 900 MHz y los 1900 MHz, que permitirán una operación segura del FRMCS tanto durante el

periodo de coexistencia con el GSM-R, como después de finalizar este periodo de migración.

Tal como indica la UIC en [4] y se representa en la figura 10, el proceso de desarrollo del FRMCS se completará a finales de 2024, por lo que se espera disponer ya de una versión estable y preparada para ser licitada al principio del año 2025.

4. LA NAVEGACIÓN POR SATÉLITE. UTILIZACIÓN DE GALILEO

Galileo o EGNSS (*European Global Navigation Satellite System*) es el programa europeo de radionavegación y posicionamiento por satélite, impulsado por la Unión Europea (UE) y desarrollado conjuntamente por la Agencia Europea de Navegación por Satélite (GSA) y por la Agencia Espacial Europea (ESA), sobre el que se ha integrado el sistema de aumentación EGNOS basado en estaciones terrestres y satélites geoestacionarios, cuya función es la de corregir las señales de sistemas de navegación por satélite en Europa.

En el ámbito de los transportes, la integración de EGNOS en el Programa Galileo supone un salto importante debido principalmente a la implementación de un servicio de seguridad de la vida humana integrado, y de gran calidad para aplicaciones en las que la seguridad es una premisa básica, como lo es el transporte ferroviario.

En este apartado cabe destacar la iniciativa de Europa hacia el uso del sistema Galileo en el ferrocarril a través de distintos programas: Fondo Europeo para Inversiones Estratégicas (EFSI) o Fondos Estructurales y de Inversión Europeos (ESIF), el Instrumento de Interconexión para Europa (CEF) u Horizonte 2020 (bajo el que se encuentra la iniciativa ferroviaria *Shift2Rail*).

La integración de Galileo en el ERTMS está prevista en los próximos años para mejorar el posicionamiento del

tren de forma totalmente segura y, sobre todo, para permitir la reducción de elementos en vía que lastran económicamente tanto la implantación como el mantenimiento del sistema de señalización en su conjunto. Tanto los elementos de detección del tren, circuitos de vía y/o contadores de ejes, como las balizas de señalización mediante la introducción del concepto de “baliza virtual” que permite el sistema Galileo.

El CEDEX, a través de su Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria, forma parte de varios consorcios internacionales relacionados con la aplicación de Galileo en el ámbito ferroviario y que se describen de forma somera a continuación:

El proyecto ERSAT-GGC (*Galileo Game Changer*) supone un paso adelante en la adopción de la tecnología de satélites EGNSS en la evolución del ERTMS mediante la validación y certificación compatible con los estándares ERTMS. En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos de la clasificación de tres áreas relevantes de la línea Almorchón-Alhondiguilla mediante el uso de la herramienta de caracterización de las señales GNSS del proyecto ERSAT-GGC.

En esta aspecto, son varias las iniciativas de la Agencia Europea de Navegación por Satélite (GSA) y la Agencia Espacial Europea (ESA) que estudian la mejoras que supone la integración del GNSS en el ferrocarril, entre las que se encuentra el proyecto *GATE4Rail*, donde se define un laboratorio virtualizado de GNSS y ETCS que permite probar trenes que gestionan las señales GNSS (implementando modelos caracterizados para el entorno ferroviario), y que circulan por una línea ERTMS. El objetivo es el desarrollo de herramientas de pruebas, que permitan la automatización de la simulación y verificación en la implementación de un sistema de señalización ERTMS mediante GNSS para localización segura de trenes. En la figura

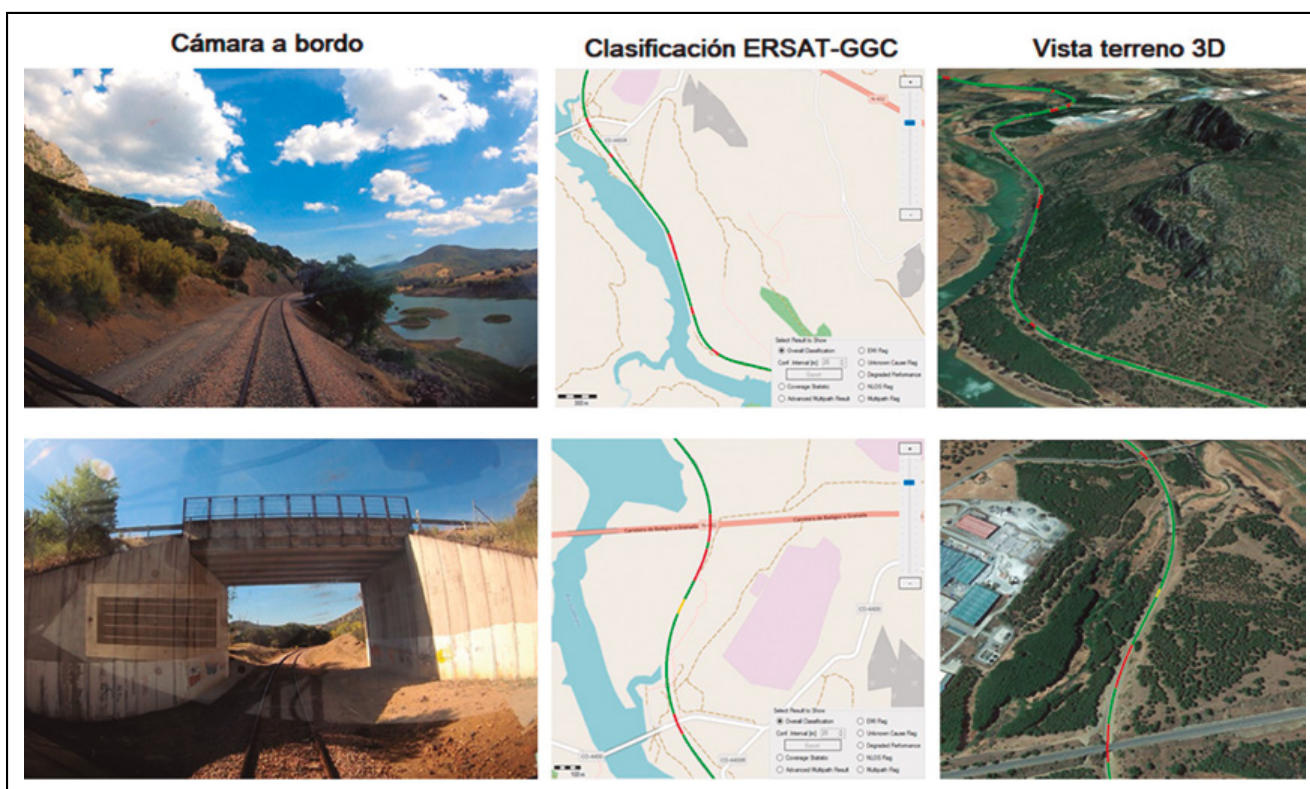


Figura 11. Clasificación GNSS del proyecto ERSAT-GGC para la línea Almorchón-Alhondiguilla (Fuente: ERSAT-GGC y Google Earth).

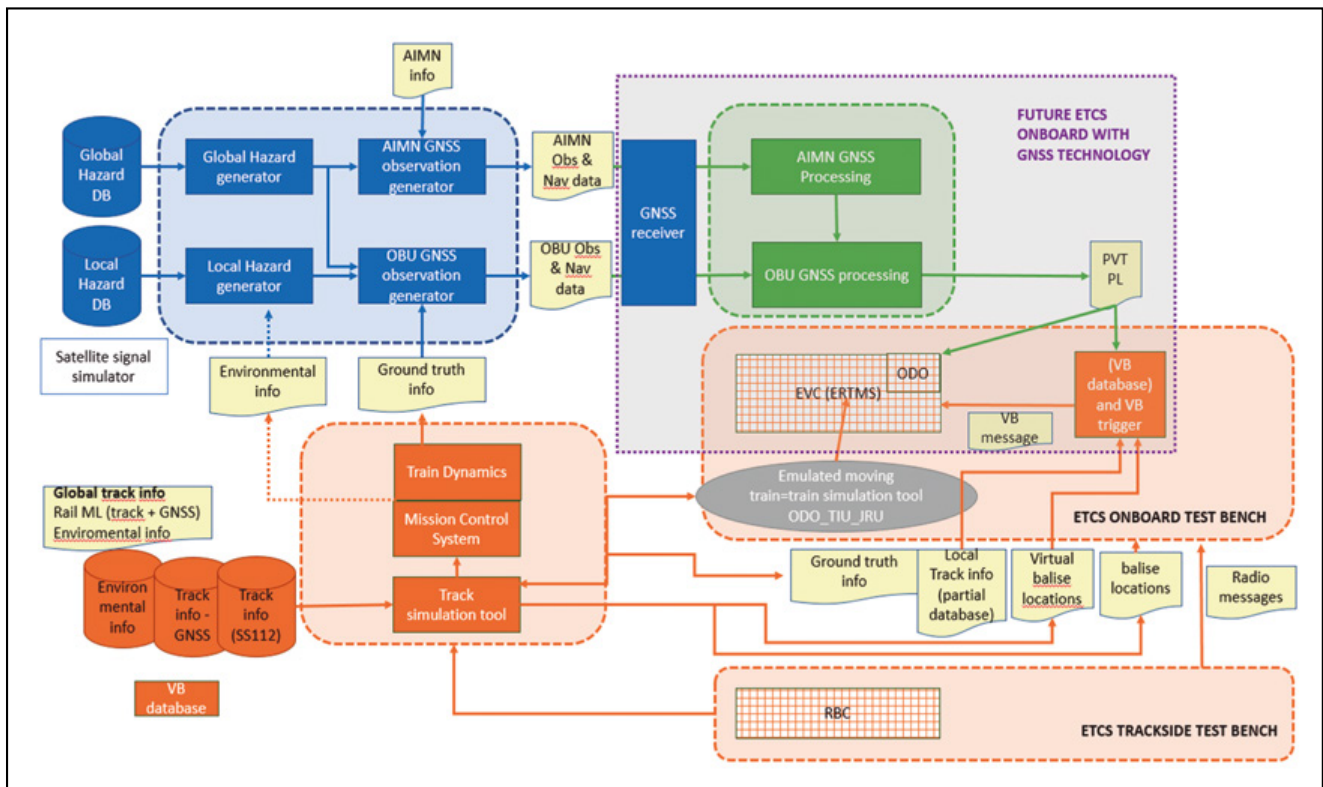


Figura 12. Simulación virtual conjunta de Galileo y ERTMS en el Proyecto GATE4RAIL (Fuente: GATE4Rail D2.1).

12 se muestra la plataforma de simulación y verificación geo-distribuida de este tipo de gemelo digital conectando centros de referencia europeos de GNSS con el LIF.

Continuando con la apuesta de la utilización de Galileo en el entorno ferroviario, el CEDEX formará parte del consorcio que se ha adjudicado el proyecto RAILGAP de innovación en el ámbito de la digitalización del terreno. Este proyecto está enfocado en el desarrollo de soluciones innovadoras basadas en la hibridación de tecnologías basadas en GNSS, con el objetivo implementar nuevas metodologías y desarrollar herramientas que permitan disponer de datos del terreno y mapas digitales de alta integridad y precisión.

5. LOS GEMELOS O MODELOS DIGITALES DEL SISTEMA FERROVIARIO

5.1. Gemelo Digital del ERTMS

Uno de los objetivos señalados explícitamente en el programa europeo de investigación ferroviaria *Shift2Rail* es el desarrollo de gemelos digitales del sistema de señalización ERTMS que permitan el ensayo del mismo en laboratorio y reduzcan considerablemente de pruebas en vía que constituye uno de los cuellos de botella para el despliegue del ERTMS en toda la red transeuropea. Es el programa denominado “Zero on site tests”, que persigue la posibilidad de ejecutar en el laboratorio todos los ensayos funcionales que deben demostrar la compatibilidad de un equipo embarcado ERTMS con los equipos de vía.

El LIF ha sido el primer laboratorio europeo en realizar los ensayos de puesta en servicio de las líneas ERTMS en el laboratorio, tal y como se detalló de forma expresa en el artículo publicado previamente en esta revista [5].

En efecto, el LIF integra en el laboratorio los equipos reales ERTMS, tanto el equipo embarcado o EVC

(*European Vital Computer*) como el equipo de vía para el nivel 2 de ERTMS o RBC (*Radio Block Center*), mediante una simulación del movimiento del tren y de su desplazamiento a lo largo del trayecto. Equipado con ERTMS reproduce la situación operacional en el laboratorio chequeando el correcto funcionamiento del sistema completo mediante la reproducción de la comunicación real entre el EVC y el RBC o, en otras palabras, un intercambio de mensajes ERTMS idénticos a los que se producirían en el entorno real si la prueba se ejecutase en la vía.

Esto es lo que constituye un gemelo digital del sistema completo ERTMS y se prueba el comportamiento de los equipos reales ERTMS mediante su integración en el laboratorio (*Hardware on the Loop*), pudiendo realizarse esta integración de forma física con la ubicación de dichos equipos en el LIF, o incluso de forma remota mediante la conexión de dichos equipos a los simuladores del LIF a través de la red TCP/IP y con los protocolos definidos en el Subset-111 definido por la industria europea de señalización (Consortio UNISIG).

La figura 11 muestra la instalación en el LIF de todos los componentes para las pruebas de la LAV Valladolid-León-Burgos, equipada por las empresas Alstom y Bombardier, habiéndose probado de forma exitosa el handover o transición entre dos RBCs de diferentes compañías por primera vez en un laboratorio independiente.

El LIF ha ensayado hasta la actualidad el ERTMS de más de once líneas equipadas con el sistema, la mayor parte líneas españolas, más algunas extranjeras como la línea Meca-Medina o una línea que se desplegará en Dakar (Senegal). De esta forma ha demostrado la viabilidad de ensayar el ERTMS en un **gemelo digital en laboratorio**, y se ha constituido como el laboratorio más avanzado en el mundo en este tipo de ensayos.

Adicionalmente, se está desarrollando un programa interno de automatización de los ensayos de ERTMS, que

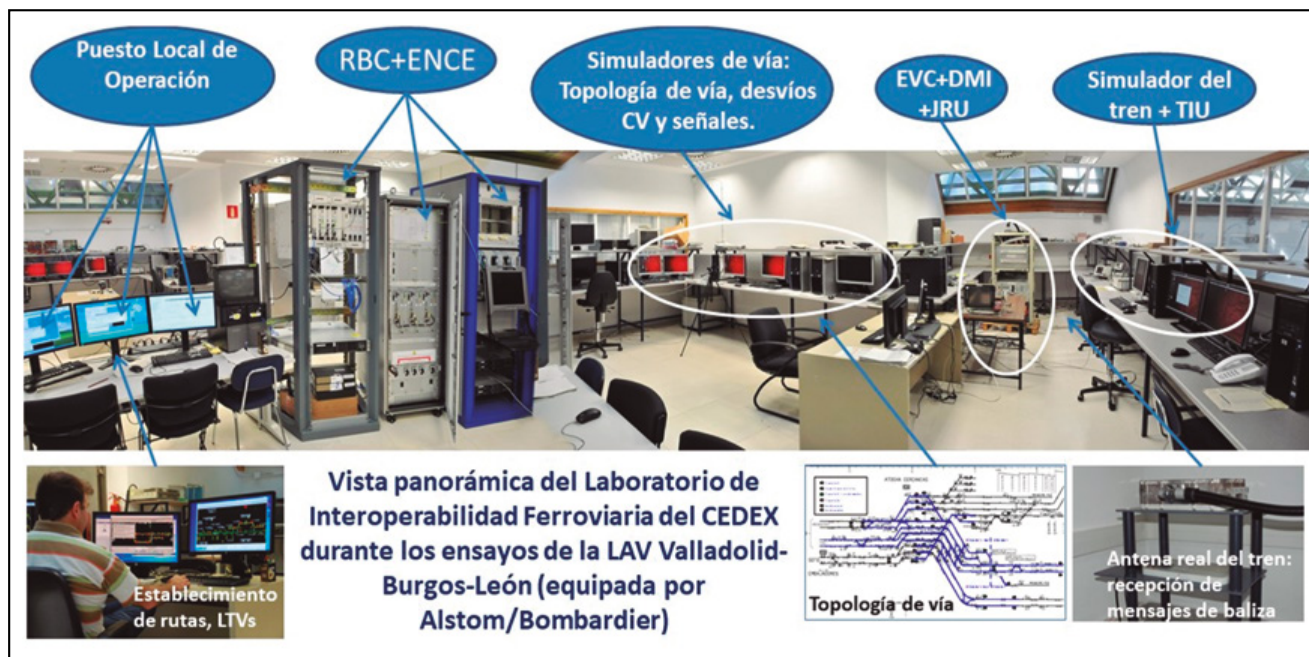


Figura 13. Pruebas de ERTMS en el LIF de la LAV Valladolid-León-Burgos.

permitirá, mediante la introducción de modernas técnicas digitales, la automatización de los ensayos en un sistema integral que va desde la ejecución de las acciones de forma remota sobre el display del maquinista o DMI (*Driver Machine Interface*) con un robot, pasando por un sistema de visión artificial para reconocer los eventos aparecidos en el DMI, hasta la implementación de algoritmos de inteligencia artificial para la evaluación automática del resultados de los ensayos.

5.2. Los modelos digitales de la infraestructura

Otra de las instalaciones singulares de las que dispone el CEDEX para ensayar la Infraestructura Ferroviaria es el Cajón de Ensayos de Vía y Plataforma (*Track-Box*). El cajón ferroviario es una instalación de 21 m de longitud, 5 m de anchura y 4 m de profundidad que permite ensayar a escala 1:1 secciones completas de vías férreas convencionales y de alta velocidad, simulando el paso de trenes, tanto de pasajeros, mercancías o tráfico mixto, con velocidades de hasta 420 km/h y con cargas por eje hasta 50 t. La figura 14 muestra una panorámica de la instalación.

La principal ventaja de su utilización radica en el hecho de que en tan sólo una semana de trabajo en laboratorio se puede



Figura 14. Vista general del Cajón Ferroviario del CEDEX.

determinar el efecto que tiene el tráfico anual de trenes en una sección de vía real, por lo que cualquier innovación que se desee incorporar en la tecnología de la infraestructura ferroviaria puede ensayarse bajo condiciones de tráfico real, de forma previa a cualquier sección de ensayo en vía real.

Obviamente el cajón ferroviario no constituye ningún gemelo digital de la infraestructura, sino una instalación de ensayos acelerados a escala real. Sin embargo, la gran precisión (0,01 mm) y número de sensores (125) con los que se miden en las distintas componentes de la vía el efecto de la simulación del tráfico de trenes, permiten calibrar de forma muy fiable modelos numéricos en 3D. Y son estos modelos numéricos desarrollados por el LG los que si constituyen un gemelo digital de la infraestructura ferroviaria.

En efecto, en los últimos años, el LG ha impulsado la modelización numérica de secciones de vías férreas como una herramienta adicional en el análisis de su comportamiento dinámico al paso de trenes con diferentes velocidades de circulación. Dicha modelización numérica se realiza con programas comerciales, basados en las técnicas de los elementos finitos (MEF) o de diferencias finitas (MDF), modificando adecuadamente las ecuaciones constitutivas de los materiales involucrados para tener en cuenta el comportamiento no-lineal de dichos materiales. En la figura 15 se muestran algunos de los resultados de dicha modelización.

Por otra parte, también se han usado estas modelizaciones numéricas para corroborar los resultados obtenidos, relativos a la velocidad crítica de las secciones ferroviarias (también mostrado en la figura 15), con un modelo basado en el Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW) desarrollado en el LG en colaboración con el con el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). A este respecto, la velocidad crítica es la velocidad de circulación del tren que produce un fenómeno de amplificación del movimiento vertical de los componentes de la vía y del terreno, que pueden comprometer la estabilidad de la vía y la seguridad de los pasajeros.

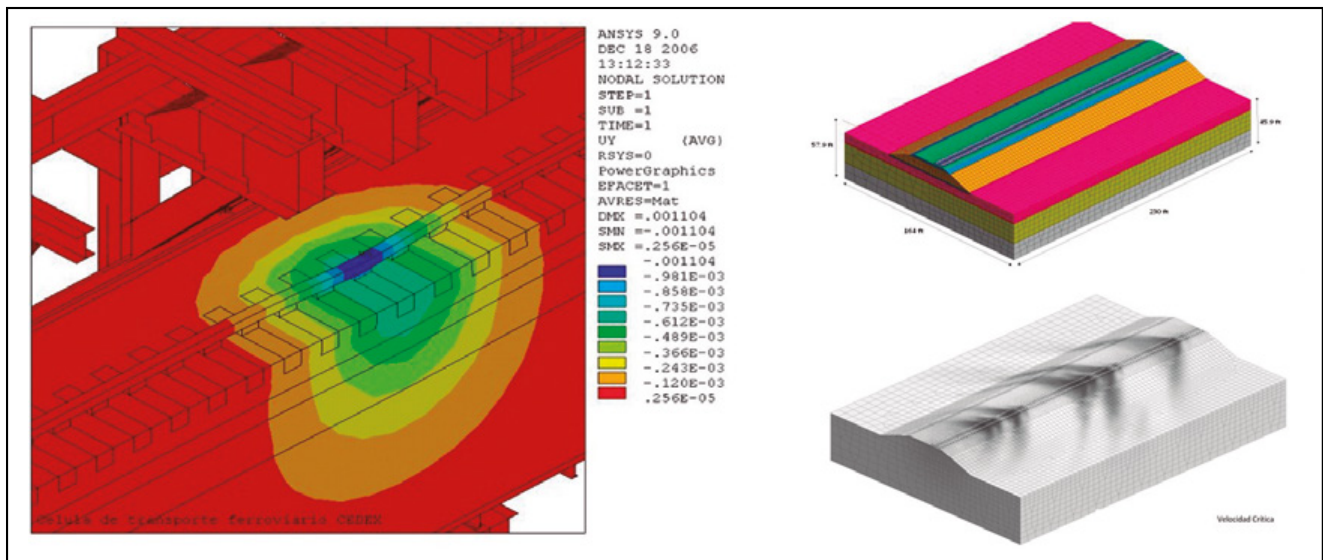


Figura 15. Modelización por elementos finitos de la infraestructura ferroviaria.

6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha realizado una introducción a lo que se entiende como proceso de la digitalización del ferrocarril y para ello se han descrito las principales áreas en las que el CEDEX, a través del LIF y el LG, está desarrollando actividades muy relevantes en este campo.

La digitalización del ferrocarril es una necesidad para potenciar este medio de transporte, que si bien presenta los más altos índices de seguridad y de eficiencia energética, precisa de un avance en los sistemas digitales que permitan adecuarlo al futuro. Las tecnologías digitales permitirán mejorar de forma muy sustancial, no solo los servicios al cliente que se beneficiarán de los modernos sistemas de comunicaciones, sino además los sistemas de digitalización de la infraestructura y de introducción de tecnologías digitales en la señalización ferroviaria, así como los de virtualización o creación de gemelos digitales.

La digitalización de la infraestructura con modernas técnicas de tratamiento de imagen o de láser permitirán crear, junto con las tecnologías de *Big Data* e Inteligencia Artificial, grandes bases de datos que incluyan todos los elementos de la infraestructura ferroviaria, facilitando una gestión de activos digitalizada e inteligente que redundará en una significativa reducción de los costes de mantenimiento y explotación, uno de los aspectos que lastran de forma muy significativa los costes del transporte ferroviario.

Por otro lado, la utilización de tecnologías digitales en los sistemas de señalización ferroviaria y más en concreto en el sistema europeo ERTMS, permitirá la introducción de las nuevas funcionalidades requeridas por el sistema ferroviario, como la conducción automática, el cantón móvil para aumentar la frecuencia, el nuevo sistema de comunicaciones basado en tecnología 5G (FRMCS) o la utilización del posicionamiento por el sistema europeo Galileo. Todas estas nuevas funcionalidades requieren de un sistema digital como el ERTMS. Por ello se ha venido a afirmar que “el ERTMS es la columna vertebral sobre la que se desarrollará la digitalización del ferrocarril”. Sin la implantación previa del ERTMS es imposible dar este salto digital.

Esto resulta en que la inminente necesidad de que el despliegue del ERTMS se acelere, no solo en España, sino en toda Europa, ya que sin este paso necesario será imposible conseguir este salto digital del ferrocarril. El mantenimiento

de los diferentes sistemas nacionales en Europa está lastrando de forma muy pesada el sistema de transporte ferroviario. Con sistemas analógicos, como el ASFA y ASFA Digital en España, que no solo tienen niveles de seguridad muy inferiores al ERTMS, sino que impiden la incorporación de nuevas prestaciones basadas en tecnología digital.

Por último, la incorporación de tecnología digital permite el desarrollo de gemelos digitales que, a través la virtualización del sistema ferroviario, facilitan la simulación del comportamiento del sistema mediante modelos digitales del mismo y, además, la ejecución en laboratorio de gran número de pruebas, incluso integrando de forma local o remota los elementos reales a ensayar *Hardware on the Loop*. Esto acelerará el despliegue de los modernos sistemas digitales y, en concreto, del ERTMS mediante el traslado al laboratorio de las costosas pruebas del sistema que antes se realizaban en la vía. El CEDEX, con sus dos laboratorios de Interoperabilidad Ferroviaria y Geotecnia, es pionero en la utilización de técnicas digitales y está considerado como uno de los referentes europeos en este campo.

7. REFERENCIAS

- [1] European Partnership under Horizon Europe: Transforming Europe's Rail System. Version 1 July 2020.
- [2] UNIFE (The European Rail Industry) UNIFE Vision Paper on Digitalization: Digital trends in the Rail Sector. 15 April 2019.
- [3] Quaglietta, E., Wang, M., y Goverde, Rob M.P. (2020). A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. Vol. 15, 100195, September 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100195>.
- [4] Mandoc, D., y Evangelhelou, J.M. (2020). FRMCS: More than just a successive replacement for GSM-R.D.. *Global Railway Review*. May 2020.
- [5] Iglesias, J.I., Bueno, J., Molina, D., Herranz, S., Cáceres, R., Fernández, M., y López, M. (2019). El papel del Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX en el proceso de puesta en servicio de líneas y trenes ERTMS. *Ingeniería Civil*, nº 194 (diciembre 2019), pp. 20-24.
- [6] GeoBit Consulting SL (2020). Pointbox. <https://www.pointbox.xyz/clouds/5edfa7a357e57afc0322e737>
- [7] GeoBit Consulting SL (2020). Pointbox. <https://www.pointbox.xyz/clouds/5edf9e8657e57a45c422e735>