



Máster Universitario en
Sistemas Ferroviarios

Instalación Sistema ERTMS N2 con Balizas Virtuales

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO:2020/2021

Master Universitario en Sistemas Ferroviarios
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI

Autor: Esteban Gómez Cepa

Director/es: Ricardo Campo Cascallana

TÍTULO: Instalación Sistema ERTMS N2 con Balizas Virtuales

AUTOR: Esteban Gómez Cepa

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Gomez', enclosed within a large, horizontal, oval-shaped flourish.

DIRECTOR: Ricardo Campo Cascallana

Firma:

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping, diagonal strokes that form a stylized, abstract shape.

FICHA TÉCNICA



| |
|---|
| SOLICITUD DE ADMISIÓN DEL TRABAJO FIN DE MASTER (6 ECTS) Máster en Sistemas Ferroviarios (Entregar al Profesor Tutor de Prácticas en Comillas) |
|---|

Datos del alumno:

| | |
|-----------------------|-----------------|
| Apellidos: Gómez Cepa | |
| Nombre: Esteban | NIF: 51514414-A |
| | |
| | |
| | |

Datos del director del Trabajo:

| | |
|--------------------------------|--|
| Apellidos: Campo Cascallana | |
| Nombre: Ricardo | NIF: 71452737-V |
| Empresa: CEDEX | Dirección de la empresa: C/ Julián Camarillo, 30, 28037 Madrid |
| e-mail: ricardo.campo@cedex.es | Teléfono: 651743834 |

Datos del co-director del Trabajo (si procede):

| | |
|------------|--------------------------|
| Apellidos: | |
| Nombre: | NIF: |
| Empresa: | Dirección de la empresa: |
| e-mail: | Teléfono: |

Título del Trabajo Fin de Máster:

Implantación del sistema ERTMS N2 con Balizas Virtuales en el Tramo Guardo-Arija (Línea León-Bilbao)

Descripción breve:

Este trabajo de fin de Máster comprende el diseño de una implantación del sistema ERTMS en líneas regionales de baja ocupación. El tramo elegido a estudio se sitúa entre las estaciones de Guardo a Arija de la línea León-Bilbao.

El sistema a implementar es una variante del sistema ERTMS de nivel 2 que contempla la sustitución de las balizas físicas (Eurobalizas) por balizas virtuales (VB), utilización

de redes de radio públicas en lugar de sistemas de comunicación específicos del sistema ferroviario (GSM-R) y el empleo de un sistema de posicionamiento de los trenes mediante satélite (GNSS) que complementarían a los sistemas de odometría tradicional (tacogeneradores, radares doppler y/o acelerómetros)

En este trabajo se pretende definir la posición e información que debería transmitirse al tren en las diferentes posiciones de las Balizas Virtuales concluyendo con la realización de una campaña de ensayos en el Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX para la solución propuesta.

Objetivos:

- Parametrizar y caracterizar el tramo de la línea propuesta
- Diseño de la señalización ferroviaria y su localización
- Localización de las balizas virtuales de acuerdo a los datos de vía
- Definición de los datos ERTMS
- Prueba de interoperabilidad con un EVC en Laboratorio
- Estudio comparativo ERTMS N2 Convencional

Aportaciones previstas del Trabajo:

El trabajo toma como referencia distintos proyectos del programa “Horizonte2020” puesto en marcha por la Unión Europea, en concreto mediante la iniciativa Shift2Rail. Dentro de esta iniciativa cabe destacar los proyectos GATE4Rail (GNSS Automated Virtualized Test Environment for RAIL) y ERSAT (ERTms + SATellite) en relación a la utilización de la tecnología GNSS en la señalización ferroviaria y el proyecto VITE (Virtualisation of the testing environment) para el contenido y forma de la digitalización de los datos de vía.

Adicionalmente, este trabajo tiene por objetivo el apoyar el Plan Nacional de Implementación ERTMS (2017) donde uno de los objetivos principales era la reducción de costes en el sistema ERTMS Nivel 2 con balizas físicas.

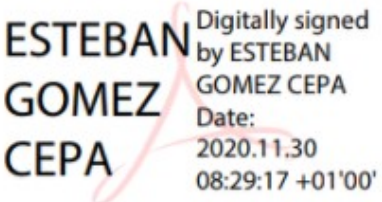

A nivel académico este trabajo permite profundizar y poner en práctica los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Señalización Ferroviaria y de Normativa ERTMS y RAMS, en una línea actualmente en servicio con sistema de señalización ASFA.

Además se busca profundizar en la normativa ERTMS mediante la aplicación de los requisitos especificados por la ETI (Especificación Técnica de Interoperabilidad) y trabajar en línea con las iniciativas desplegadas por la Unión Europea para la utilización del sistema Galileo en el ámbito ferroviario.

Planificación de tareas:

Las tareas a realizar se desglosan a continuación:

1. Caracterización de la línea (Febrero-Marzo)
2. Análisis de la señalización ferroviaria existente (Marzo)
3. Estandarización de los datos de acuerdo al Subset 026 (Marzo-Abril)
4. Localización de las Balizas Virtuales (Abril-Mayo)
5. Definición de los datos ERTMS (Mayo)
6. Estudio Comparativo ERTMS N2 Convencional (Mayo)
7. Pruebas en Laboratorio (Mayo-Junio)

| | |
|---|---|
| <p>Alumno: Esteban Gómez Cepa Firma:</p>  <p>ESTEBAN GOMEZ CEPA</p> <p>Digitally signed by ESTEBAN GOMEZ CEPA Date: 2020.11.30 08:29:17 +01'00'</p> | <p>Director: Ricardo Campo Firma:</p>  <p>X</p> <p>02/05/2021</p> <p>Ricardo Campo</p> <p>Firmado por CAMPO CASALLANA RICARDO DNI 11452137V</p> |
|---|---|

| | |
|--|--------------------------------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1.1. Breve resumen de la historia del sistema ERTMS | 7 |
| 1.2. Estado Actual en España | 8 |
| 1.3. Descripción Del Sistema ERTMS | 11 |
| 1.4. Descripción Del Concepto de Balizas Virtuales | 12 |
| 2. OBJETIVOS..... | 14 |
| 2.1. Parametrización y caracterización el tramo de la línea propuesto | 14 |
| 2.2. Análisis de la señalización ferroviaria y su localización..... | 14 |
| 2.3. Localización de las balizas y de las balizas virtuales de acuerdo a los datos de vía ... | 14 |
| 2.4. Definición de los datos ERTMS..... | 14 |
| 2.5. Prueba de interoperabilidad con un EVC en Laboratorio | 14 |
| 2.6. Estudio comparativo con un sistema ERTMS Nivel 2 Convencional..... | 14 |
| 3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS | 15 |
| 4. Parametrización y caracterización del tramo de la línea propuesto..... | 16 |
| 4.1. Características del tramo de línea a estudiar | 16 |
| 4.2. Definición del tramo | 17 |
| 4.3. Procesamiento de datos obtenidos..... | ¡Error! Marcador no definido. |
| 5. Análisis de la señalización ferroviaria y su localización | 26 |
| 6. Localización de las balizas y las balizas virtuales de acuerdo a los datos de vía..... | 29 |
| 6.1. Balizas Físicas | 29 |
| 6.2. Balizas Virtuales | 29 |
| 6.3. Resultados | 30 |
| 7. Definición de los Datos ERTMS | 31 |
| 8. Prueba de interoperabilidad con un EVC en Laboratorio..... | 36 |
| 9. Estudio comparativo con un sistema ERTMS Nivel 2 Convencional | 37 |
| 10. CONCLUSIONES Y APORTACIONES..... | 38 |
| 11. BIBLIOGRAFÍA..... | 40 |

1. INTRODUCCIÓN

El ERTMS (European Rail Traffic Management System) es un sistema de señalización y control de la velocidad que asegura la interoperabilidad de las sistemas ferroviarioa nacionales, que reduce los costes de instalación y mantenimiento de las sistemas de señalización y que permite el aumento de la velocidad de los trenes, la capacidad de la infraestructura y el nivel de seguridad en el transporte ferroviario [1].

El ERTMS comprende el subsistema ETCS (European Train Control System), el GSM-R (Global System for Mobile communications for Railways) y las reglas de operación.

Se rige según la Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI en Castellano / TSI en Inglés) de Mando y Señalización, cuyo autor y encargado de las modificaciones es la Agencia Europea de Seguridad.

1.1. Breve resumen de la historia del sistema ERTMS

El origen de este sistema se remonta a 1980, tras la decisión de la Comisión Europea de la creación de un espacio ferroviario único en Europa que permitiese armonizar los diferentes sistemas ferroviarios existentes en Europa. En 1989 se crea un comité de expertos dedicado a la especificación de los requisitos que este nuevo sistema debe adoptar. Se establece, entre otros, que debe haber un sistema discontinuo de transmisión de información (Eurobalizas) y un sistema continuo (EuroRadio) y en 1993 la Unión Europea publica una directiva de Interoperabilidad, y en respuesta se crea la estructura para definir las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad.

Más adelante, en 1995, la Comisión Europea define la estrategia para el futuro desarrollo del ERTMS, con el propósito de definir la implementación del Marco Europeo Ferroviario. En 1998 se crea el grupo de trabajo UNISIG, formado por las empresas Alstom, Ansaldo STS, AZD Praha, Bombardier, CAF, MerMec, Siemens and Thales , que agrupa los principales fabricantes europeos para formalizar las especificaciones y en 1999 se publica los Class P SRS (System Requirement Specification) y se consolidan en el año 2000, como Class 1 SRS. En este momento, podemos decir que el ERTMS ha nacido.

Estas especificaciones se revisaron, aún a día de hoy se siguen revisando y modificando, con para incluir nuevas funcionalidades que se ajusten mejor a las necesidades tanto de operadores como de administradores de infraestructura. Actualmente, las especificaciones vigentes se denominan bajo la versión 2.3.0d, aprobadas por la Comisión Europea en 2008. Estas especificaciones se actualizan como ya hemos comentado bajo la supervisión de la ERA en colaboración con la industria de la señalización y los grupos de interés.

Con el objetivo de impulsar la implementación la Unión Europea junto a los estados miembros comienza a financiar la implementación del ERTMS, y se firman una serie de acuerdos para el futuro desarrollo del ERTMS, identificando seis corredores prioritarios y en 2009 su implementación se convierte en obligatoria, con fecha de finalización 2020.[2]

Estos corredores son:

- Rotterdam-Genova
- Stockholm- Napoli
- Antwerpen-Dijon/ Basel
- Budapest-Valencia
- Desden-Constant Aachen-Terespol

En 2017, se libera la versión 3 (Baseline 3) de las especificaciones, la cuál es una versión más estable y madura, lista para resolver los problemas de interoperabilidad y se renueva el compromiso de los miembros del comité UNISIG de continuar con el desarrollo del ERMTS, así como se le exige a los Estados Miembros los Planes Nacionales de Implementación del ERTMS, teniendo que actualizarse estos cada 5 años.

1.2. Estado Actual en España

El Plan Nacional De Implementación ERTMS (2017) [3] surge a raíz del artículo 6.5 del reglamento 2016/919 de la Comisión Europea. Este plan, elaborado según los puntos especificados en el reglamento 2016/919, describe el contexto actual, la estrategia para su implementación, las medidas adoptadas para garantizar las condiciones de mercado abierto, la planificación y las conclusiones del mismo.

Este plan describe la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG), compuesta por las infraestructuras esenciales para garantizar un sistema común de transporte ferroviario en todo el Estado.

La RFIG está compuesta por tres tipos de redes:

- Red de Ancho Ibérico, de ferrocarril convencional principalmente y un ancho de vía de 1668 mm
- Red de Ancho Estándar, principalmente infraestructura de Alta Velocidad y ancho de vía de 1435 mm
- Red de Ancho Métrico, de 1000 mm de ancho de vía.

Los principales sistemas de señalización instalados en la RFIG son:

- ERTMS
- LZB
- EBICAB
- ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático)

El sistema ASFA es mayoritario, ya que se encuentra instalado en todas las líneas principales de la RFIG, junto a su versión evolucionada, el ASFA Digital.

Según la Declaración de Red [4] de ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) existen 157,4 km de líneas instaladas con el sistema ERTMS, para ferrocarril Convencional y según la Declaración de Red [5] de ADIF AV (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias de Alta Velocidad) en España existen 2047,4 km de líneas equipadas con ERTMS.

A continuación se muestra una tabla extraída del Plan Nacional de Implementación ERTMS (2017) mostrando las principales sistemas de señalización instalados por líneas:

| Eje/Línea | Tramos principales | En servicio |
|--|---|---|
| Madrid Chamartin-Valladolid | Madrid-Bifurcación Venta Baños | ERTMS N1 (versión 2.2.2), ASFA |
| Madrid Atocha-Barcelona-Frontera Francia | Madrid-Límite Adif-TP Ferro Bifurcación Cambiador Plasencia de Jalón- Cambiador Plasencia de Jalón Bifurcación Cambiador Zaragoza-Delicias | ERTMS N1 (versión 2.2.2), ASFA |
| Madrid Atocha - Toledo/Sevilla Santa Justa/ Málaga María Zambrano | Bifurcación Málaga -A.V. - Málaga María Zambrano Madrid – Sevilla La Sagra - Toledo | ERTMS N1 (versión 2.2.2), ASFA, LZB, ASFA LZB, ASFA |
| Madrid Atocha-Levante | Bifurcación Torrejón de Velasco-Valencia Joaquín Sorolla Bifurcación Blancales- Yeles Aguja km. 34,3 Bifurcación Albacete-Alicante | ERTMS N1 y N2 (versión 2.3.0.d), ASFA |
| Olmedo - Medina - Zamora - Ourense - Santiago de Compostela | Orense-Santiago | ERTMS N1 (versión 2.3.0.d), ASFA |
| Cercanías de Madrid | Línea C4 | ERTMS N1 (versión 2.3.0.d), ASFA |
| Madrid Chamartin - Valencia - San Vicente de Calders | Castelló de la Plana – Vandellós | EBICAB, ASFA |
| Madrid Chamartin - Valencia - San Vicente de Calders y Madrid Chamartin - Zaragoza - Lleida - Barcelona - Portbou / Cerbere | Valencia Nord (desde Vandellós) - Sant Vicente de Calders Sant Vicente de Calders – proximidades Barcelona La Encina – Valencia Nord | EBICAB, ASFA |

Imagen 1: Sistemas de Señalización Instalados por Líneas

Y un mapa de la distribución geográfica de los sistemas:



Imagen 2: Mapa geográfico de los Sistemas de Señalización Instalados por Líneas

España es uno de los principales referentes del sistema ERTMS en Europa y mediante el Plan Nacional demuestra su compromiso con la implementación del ERTMS en España, ya que el sistema ERTMS se implanta en todas las líneas de nueva construcción de Alta Velocidad, en todos aquellos nodos de Cercanías en el que el aumento de las prestaciones tiene un gran beneficio para los viajeros y en los corredores europeos.

Sin embargo este compromiso por parte de España requiere de la retrocompatibilidad con las especificaciones anteriores, es decir, los vehículos nuevos equipados con la versión Baseline 3 deben poder circular por las líneas implementadas con Baseline 2 y que se establezcan las especificaciones, por lo que los cambios solo sean justificados por no poder prestar un servicio de pasajeros normal.

1.3. Descripción Del Sistema ERTMS

Las siglas ERTMS corresponden a “European Railway Traffic Management System”, es decir “Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario”.

ERTMS es la herramienta que se pretende utilizar para solucionar los problemas que se presentan como consecuencia de la convivencia en Europa de diferentes sistemas de señalización.

En cuanto a los niveles de ERTMS la clasificación es según sigue:

- Nivel 1: El intercambio de datos entre la vía y el material rodante se realiza a través de las balizas instaladas en la vía. Es un sistema ATP de supervisión continua mediante información puntual.
- Nivel 2: Para este nivel la transmisión de los diferentes datos se realiza vía radio de manera continua y se emplean balizas, menos que en nivel 1, para la corrección de errores de posición de los sistemas de odometría embarcados y transmisión de información a través de estas balizas puntual.
- Nivel 3: Es el nivel máximo de ERTMS, es similar al nivel 2, con transmisión de información de manera continua vía radio, pero además el sistema de a bordo cuenta con elementos que le permiten confirmar la integridad del tren. Actualmente este nivel no se encuentra implementado.

Existen otros niveles como el nivel 0, el cuál está diseñado para la circulación de trenes equipados con el ERTMS de abordado en vías sin ERTMS o el nivel STM, en el cuál el sistema ERTMS obtiene información de los diferentes sistemas nacionales de señalización implementados y es operado con la información que disponen estos sistemas.

El sistema ERTMS (European Rail Traffic Management System) con su subsistema de control y protección ETCS (European Train Control System), es un sistema de protección automática de trenes (ATP) con señalización en cabina y nivel de seguridad SIL 4 (Tasa admisible de fallos: $2 \cdot 10^{-9}$ fallos de seguridad/hora).

A grandes rasgos, el sistema ERTMS cuenta con diferentes modos de operación, diseñados con el objetivo de permitir su uso ante las diferentes situaciones habituales en el mundo de la operación ferroviaria. El modo nominal es el modo Full Supervisión, en el que como su propio nombre indica, la supervisión es total.

El ERTMS tiene en cuenta la información proporcionada respecto a la vía y sus condiciones así como información del tren necesaria para garantizar la operación de forma segura. Todos estos datos, que abarcan desde el gradiente o la electrificación del tramo a recorrer o el estado de los sistemas de freno así como la velocidad actual permiten al ERTMS supervisar en todo momento el estado actual y determinar ante un cambio tanto en la vía como en el tren la reacción más segura predeterminada para esa situación.

La interacción con el maquinista se realiza a través de una pantalla instalada en cabina, comúnmente llamada DMI (Driver Machine Interface) en el que se le muestra la información considerada relevante y a través de la cuál el maquinista introduce los datos relativos al tren y reconoce la información relevante proporcionada por el sistema ERTMS.

1.4. Descripción Del Concepto de Balizas Virtuales

Actualmente, la tendencia es la instalación del sistema ERTMS para ser operado en Nivel 2 la mayor parte de su recorrido. Esto se debe a un mayor nivel de seguridad, ya que la transmisión de la información se realiza vía radio, desde un RBC (Radio Block Communication) que gestiona el tráfico en un área y está conectado con los enclavamientos de dicha ruta, por lo que permite aumentar la capacidad de la línea ya que es un sistema ATP de tipo continuo. Además, tiene una ventaja económica clara, tanto en la implementación como de cara al futuro mantenimiento, que es el menor número de balizas y cableado instalado en la vía.

El Nivel 2 supone un salto tecnológico asociado a una mayor flexibilidad, fiabilidad, disponibilidad, rendimiento que repercute en un aumento de la seguridad en comparación con otros sistemas de señalización al existir una comunicación directa entre el tren y los centros de control.

En el ámbito de los costes cabe destacar que el ERTMS Nivel 2 requiere del despliegue de GSM-R (cercano a la obsolescencia tecnológica) lo que supone un coste adicional.

Para reducir el coste de implementación del sistema una de las diferentes propuestas es que las balizas situadas a lo largo de la vía necesarias para el funcionamiento del ERTMS sean virtuales, es decir, en vez de utilizar balizas físicas para detectar la posición de los trenes y transmitir información, se puedan emplear balizas virtuales que permitan mediante el sistema GNSS (Global Navigation Satellite system) la detección de la posición del tren y mediante el almacenamiento de una serie de datos en el módulo específico VBR (Virtual Balise Reader) y disparar las balizas cuando el tren alcance esos puntos.

Estas balizas virtuales permiten reducir el número de balizas físicas a lo largo de la vía reduciendo sustancialmente los costes de instalación y mantenimiento en la línea.

Se muestra a continuación un extracto del entregable D 7.1 [6] del proyecto NTGC (Next Generation Train Control) explicando la aplicación de las Balizas Virtuales:

“The VB application is based on using GNSS for the only and sole purpose of providing and absolute positioning reference at discrete locations along the track, allowing a reduction of Eurobalises installation.

However, Eurobalises are still foreseen in those emplacements where the signal-in-space (SIS) does not meet the GNSS performance requirements.

To enable the VB functionality the ETCS on-board unit shall include a new component, named as Virtual Balise Reader (VBR) which processes GNSS signals and provides balise messages, emulating the BTM, so the ETCS on-board does not actually distinguish if the balise message received comes from a virtual or a physical one.

The VBR will consist of a GNSS receiver with a PVT (position, velocity and time) unit and a database.

- A GNSS receiver for processing the SIS from the augmentation system and GNSS satellites.*
- The PVT unit provides a PVT solution for computing the train confidence interval (protection level).*
- A VBR database for storing VB locations in the vicinity, providing a balise message to the ETCS onboard unit when a match between the received GNSS and stored position occurs.*

For the VB functionality, there is no need to provide and guarantee GNSS services in a large region continuously since the performance requirements are only required at certain locations where the VB is placed.”

En resumen, indica que las Balizas Virtuales únicamente se emplean para proporcionar una referencia de posición absoluta al tren, lo que permite reducir las Eurobalizas como ya hemos explicado.

Para el empleo de estas Balizas Virtuales el sistema ETCS (European Train Control System) debe llevar a bordo un equipo denominado VBR (Virtual Balise Reader) para procesar las señales recibidas del sistema GNSS(Global Navigation Satellite System) y proporciona los mensajes de las balizas, almacenados en su memoria, simulando el comportamiento de la baliza física. .

El VBR constará de un receptor GNSS para procesar las señales, una unidad de procesamiento para calcular el intervalo de confianza del tren y una base de datos que proporciona el mensaje al VBR, para que sea transmitido al ETCS. Adicionalmente se ha observado las tecnologías de hibridación de sensores con GNSS (p. ej. sensores inerciales, tacogeneradores o imagen) con el objetivo de aumentar la precisión y, principalmente, cubrir aquellas zonas como túneles o estaciones cubiertas donde el GNSS no puede determinar una posición precisa.

La transmisión de información mediante el sistema GNSS es continua, por lo que el tren puede reportar y conocer su posición de forma continua también. Es mediante el equipo VBR que se produce el disparo de las balizas virtuales al paso del tren por los puntos previamente definidos.

2. OBJETIVOS

2.1. Parametrización y caracterización el tramo de la línea propuesto

El objetivo del trabajo consiste en definir las principales características de un sistema a implementar en un tramo de una línea actualmente en uso operada bajo Bloque Telefónico. La línea en cuestión es la línea que une León-Bilbao y el tramo a estudiar es el comprendido entre las estaciones de Guardo y Arija.

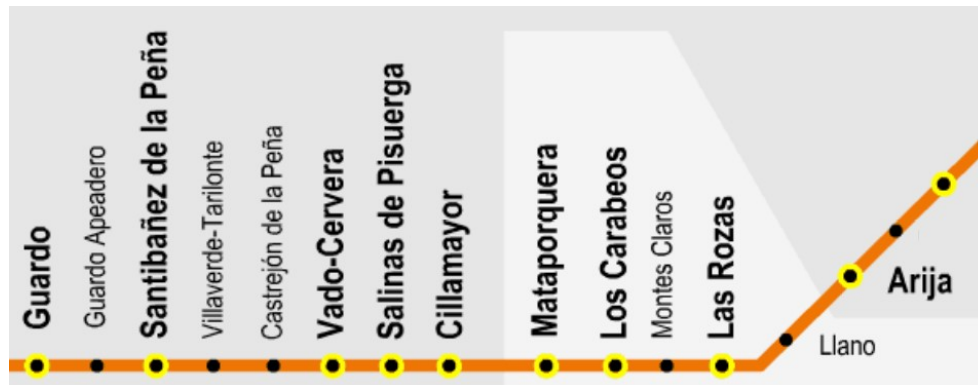


Imagen 3: Esquemático Tramo

Los datos de coordenadas 3D (Latitud, Longitud y Elevación) utilizados en este proyecto se han sido extraídos de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con precisión de 1 metros.

Estos datos se han procesado mediante el empleo del programa Matlab para la interpolación de los datos con la precisión indicada y posterior.

En relación a la herramienta de visualización utilizada se ha utilizado Google Earth.

2.2. Análisis de la señalización ferroviaria y su localización

Se procederá a un análisis del recorrido trazado para determinar la posición de los elementos relevantes para el proyecto. Estos serán las estaciones, sus señales de entrada, avanzada y salida. Se determinarán las distancias relativas de los elementos de la vía, así como su gradiente y su velocidad máxima.

2.3. Localización de las balizas y de las balizas virtuales de acuerdo a los datos de vía

A continuación, localizar las balizas virtuales necesarias de acuerdo a las Reglas de Ingeniería aplicables para líneas con baja densidad de tráfico [7].

2.4. Definición de los datos ERTMS

Definir los datos obtenidos en los pasos anteriores en formato ETMS, de acuerdo al Subset-026 v3.6.0.[8]

2.5. Prueba de interoperabilidad con un EVC en Laboratorio

Realizar una simulación de marcha con los datos obtenidos con el empleo de un EVC real en un entorno de laboratorio para detectar y corregir fallos en el diseño de vía.

2.6. Estudio comparativo con un sistema ERTMS Nivel 2 Convencional

Comparar cualitativamente las características comunes y diferentes de ambos tipos de sistema.

3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS

Las tareas realizadas son las siguientes:

- Parametrización y caracterización del tramo de línea propuesto
- Análisis de la señalización ferroviaria existente y su localización
- Localización de las Balizas y las Balizas Virtuales de acuerdo a los datos de vía
- Definición de los datos ERTMS
- Prueba de interoperabilidad en Laboratorio
- Estudio Comparativo con un sistema ERTMS Nivel 2 Convencional

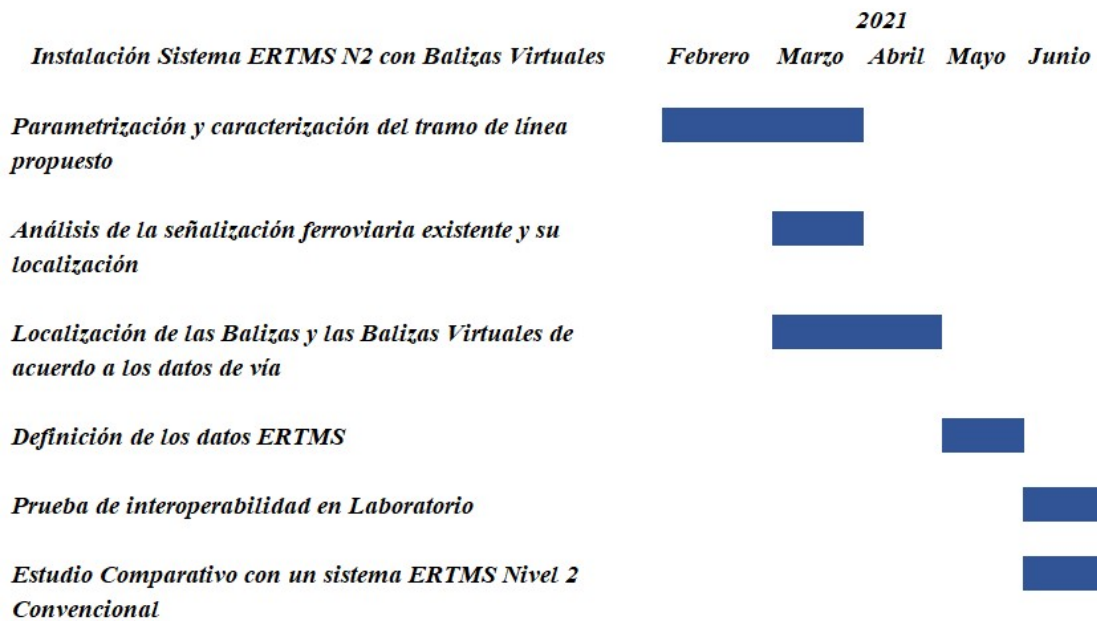


Imagen 4: Planificación

4. Parametrización y caracterización del tramo de la línea propuesto

4.1. Características del tramo de línea a estudiar

Como primera aproximación a la línea se ha realizado un análisis de la documentación de Adif para obtener la información oficial de la línea que se mostrará en este apartado. Este primer apartado pretende mencionar los elementos y su localización en la línea de forma meramente descriptiva, obtenidos a partir del documento CTC BILBAO [9].

El tramo a estudiar es el comprendido entre la Estación de Guardo y Arija de la línea que une León y Bilbao (L-790). En concreto, corresponde a la tira C-790-02 GUARDO-ARIJA, que abarca desde el PK 97/554 hasta el 194/366.

A continuación se listan el conjunto de estaciones y apeaderos en el tramo ordenados de menor a mayor punto kilométrico:

- Estación Guardo (PK 97/554)
- Apeadero de Guardo (PK 98/324)
- Estación Santibañez de la Peña (PK 107/298)
- Apeadero Villaverde Tarilonte (PK 113/120)
- Apeadero de Castrejón de la Peña (PK 120/245)
- Estación Vado-Cervera (PK 130/936)
- Apeadero Salinas del Pisuerga (PK 141/829)
- Apeadero Cillamayor (PK 151/164)
- Apeadero de Cordovilla (PK 155/327)
- Estación Mataporquera (PK 164/392)
- Estación Los Carabeos (PK 173/729)
- Apeadero Montes Claros (PK181/025)
- Apeadero Las Rozas de Valdearroyo (PK 188/115)
- Apeadero de Llano (PK 192/678)
- Estación de Arija (PK 196/050)

El tramo de esta línea es un tramo de vía única que se opera actualmente bajo el régimen de Bloqueo Telefónico (BT).

Además esta tramo cuenta con una serie de pasos a nivel. Algunos de ellos están protegidos mediante balizas ASFA y barreras, los listamos a continuación:

| Denominación | Tramo | Punto Kilométrico |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------|
| P.N. 175 Muñeca | Guardo-Santibañez | 101/980 |
| P.N. 187 Santibañez | Santibañez | 106/940 |
| P.N 217 Murgazo | Santibañez-Vado Cervera | 119/380 |
| P.N. 219 Castrejón Estación | Santibañez-Vado Cervera | 120/280 |
| P.N. 230 Las Cámporas | Vado Cervera-Mataporquera | 126/015 |
| P.N. 262 Porquera | Vado Cervera-Mataporquera | 143/397 |
| P.N 269 Bustiello | Vado Cervera-Mataporquera | 146/692 |
| P.N 273 Matamorisca | Vado Cervera-Mataporquera | 148/445 |
| P.N 285 Cordovilla | Vado Cervera-Mataporquera | 155/049 |
| P.N 296 Cuena | Vado Cervera-Mataporquera | 159/049 |
| P.N 303 Bercedo | Vado Cervera-Mataporquera | 162/201 |
| P.N 329 Aldea de Ebro | Los Carabeos-Arija | 175/538 |
| P.N 341 Campoo de Yuso | Los Carabeos-Arija | 182/280 |

Tabla 1: Pasos a Nivel Protegidos

4.2. Definición del tramo

Tras una primera aproximación se procede a estudiar más a fondo la línea con el fin de ampliar la información disponible de esta línea.

La visualización del trazado con la herramienta Google Earth ha permitido observar la orografía, el entorno y localizar los distintos elementos de señalización

El trazado se ha realizado desde el punto kilométrico PK 96/400, previo a la señal de Entrada E1 de la Estación de Guardo situada en el PK 97/763 hasta el PK 197/742, pasada la Estación de Arija,

El estudio de la línea se ha hecho desde PK's anteriores y posteriores para abarcar ambas estaciones terminales, considerandose desde el PK 96/400 hasta el PK 197/742, unos metros más allá de la señal de entrada E2 en sentido opuesto, situada en el PK 197/720.

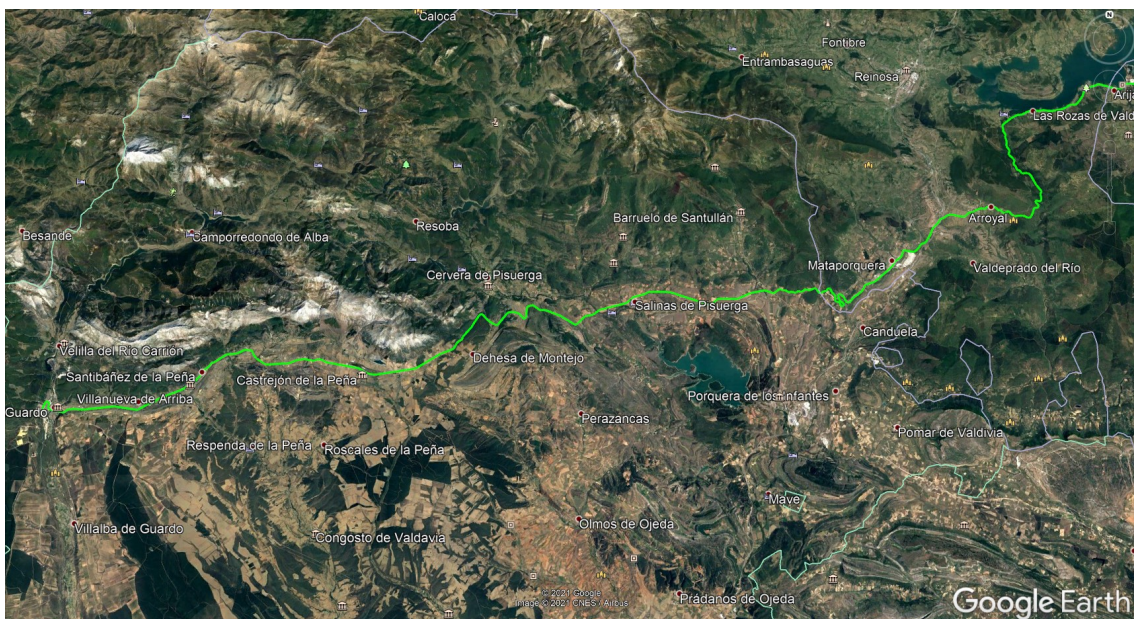


Imagen 5: Vista Aérea Tramo Guardo-Arija

Una vez extrapolados estos datos, se procede a hacer un recorrido de la línea de forma manual, marcando en el mismo recorrido todos los elementos singulares de la línea que pueden tener afección al proyecto. Estos elementos son los siguientes:

- Viaductos
- Pasos a Nivel Señalizados
- Pasos a Nivel no Señalizados
- Pasos Subterráneos

Estos puntos singulares se pueden consultar en el Anexo 5 Guardo-Arija_SGT.kml .

Se dispone a continuación una tabla que resume el conjunto de elementos singulares del tramo de línea:

| Tipo | Cantidad |
|------------------------------|----------|
| Viaductos | 6 |
| Pasos a Nivel Señalizados | 12 |
| Pasos a Nivel no Señalizados | 76 |
| Pasos Subterráneos | 28 |

Tabla 2: Elementos Singulares Tramo Guardo-Arija

La determinación de los puntos singulares indicados en la tabla anterior se pueden visualizar en el archivo “Anexo 5 Guardo-Arija_SGT.KML”.

4.3. Procesamiento de datos obtenidos

Pendiente

A partir de los datos obtenidos mediante procesados mediante Matlab y recogidos en el Anexo 1 “Guardo-Arija_SGT.xlsb” en la pestaña “Datos” se ha procedido al cálculo de las pendientes más restrictivas.

Primero, se ha calculado la pendiente metro a metro en milésimas comparando la diferencia de alturas sobre el nivel del mar en cada punto. A continuación, se ha procedido a elaborar un gráfico que recogiese las alturas de todos los puntos y poder determinar los cambios de tendencia en la pendiente del tramo.

Por último, se ha procedido a determinar los puntos de cambios de tendencia en la pendiente (ascendente y descendente) y se ha calculado la pendiente empleando la diferencia de altura entre el punto kilométrico inicial y final y la longitud de cada tramo.

El resultado se muestra en milésimas en la tabla “Cálculo Pendiente” del Anexo Guardo-Arija_SGT.xlsb

El gráfico que muestra el perfil vertical de la tabla se muestra en la pestaña “Pendiente” del Anexo 1 “Guardo-Arija_SGT.xlsb”

Limitaciones de Velocidad

Además, se ha empleado el documento “Cuadro de Velocidades Máximas e Informaciones Permanentes”[14] para determinar las velocidades máximas en el tramo. Debido a que la explotación se realiza mediante Bloqueo Telefónico, se ha deducido que esta velocidad máxima viene marcada por características de la infraestructura y no de la señalización y se ha procedido a asignar a cada punto de la línea la velocidad máxima correspondiente.

Tras hacer esto se ha notificado un elevado número de cambios de velocidad, lo cual aumenta mucho el volumen de datos a generar, y teniendo en cuenta que el tiempo de recorrido comercial actual de este tramo, se ha procedido a reducir las velocidades máximas en ciertos tramos cuya longitud es pequeña, a fin de poder agrupar tramos cuya velocidad máxima es igual y cuentan con un tramo intermedio de corta distancia a velocidad mayor.

Los campos con asterisco (*) son obligatorios

* Origen: * Fecha:

* Destino: Buscar itinerario Calcular importe

Puedes consultar los horarios a través del móvil añadiendo este [enlace](#) a tus favoritos.

| Origen | | | Destino | | |
|---------|----------|--------|----------|---------|----------|
| Paradas | Estación | Salida | Estación | Llegada | Duración |
| | Guardo | 16:36 | Arija | 18:41 | 02:05 |

Imagen 6: Horarios Guardo Arija [16]

En total el aumento de tiempo de recorrido es de 6 minutos en sentido Guardo-Arija y 5 minutos en sentido Arija-Guardo.

Se pueden ver los resultados en el Anexo Guardo-Arija_SGT.xlsb.

En los siguientes gráficos se muestra el perfil actual y el propuesto para el proyecto. En las gráficas se puede apreciar el perfil de velocidad actual existentes, en color azul, el propuesto en este trabajo en color naranja y el perfil de velocidades real teniendo en cuenta las distancias de aceleración y frenado, para un tren que cumpla los requisitos de la ETI de Material Rodante [11].

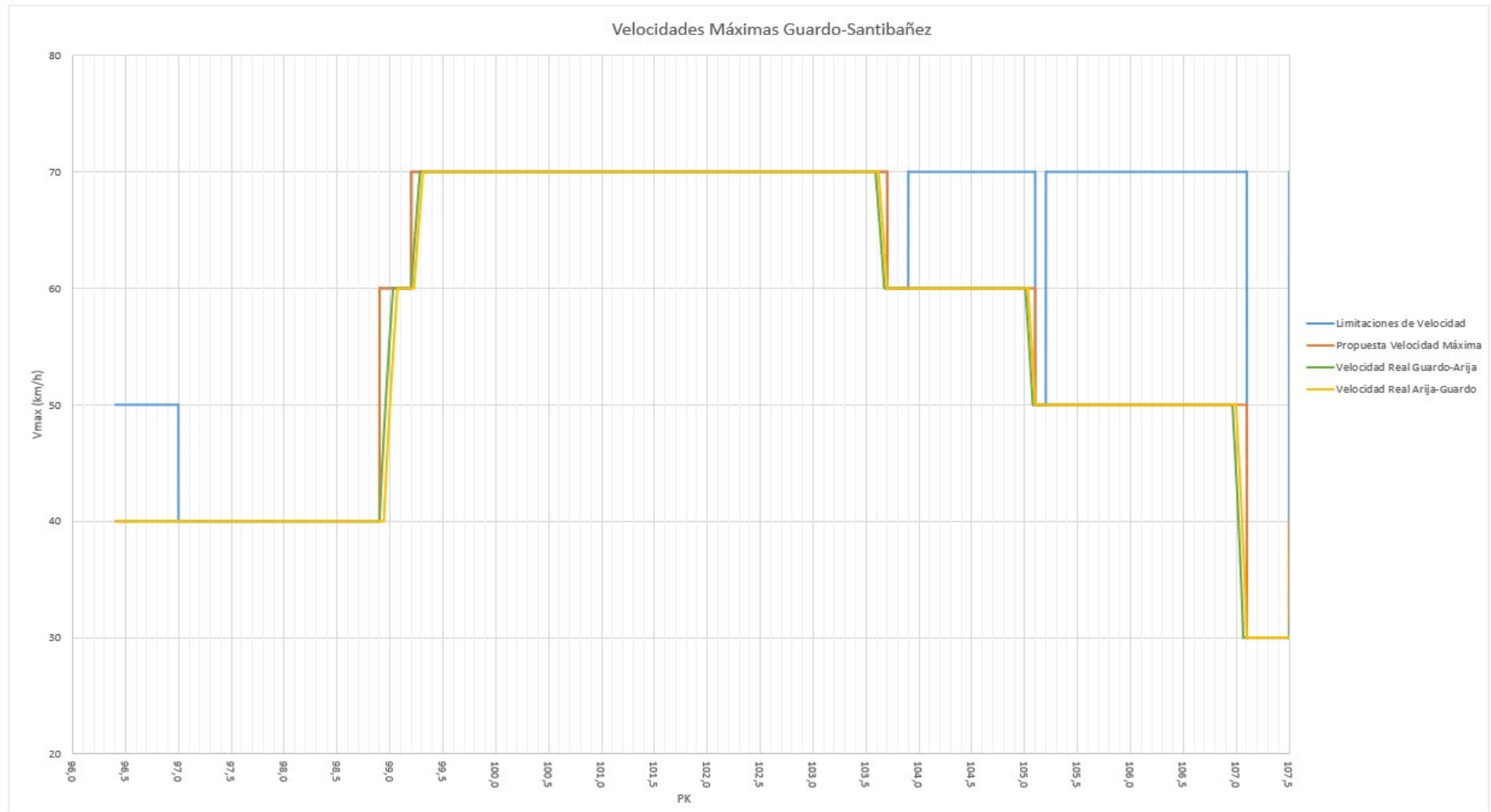


Gráfico 1.1: Cuadro Velocidades Máximas Guardo-Santibañez de la Peña

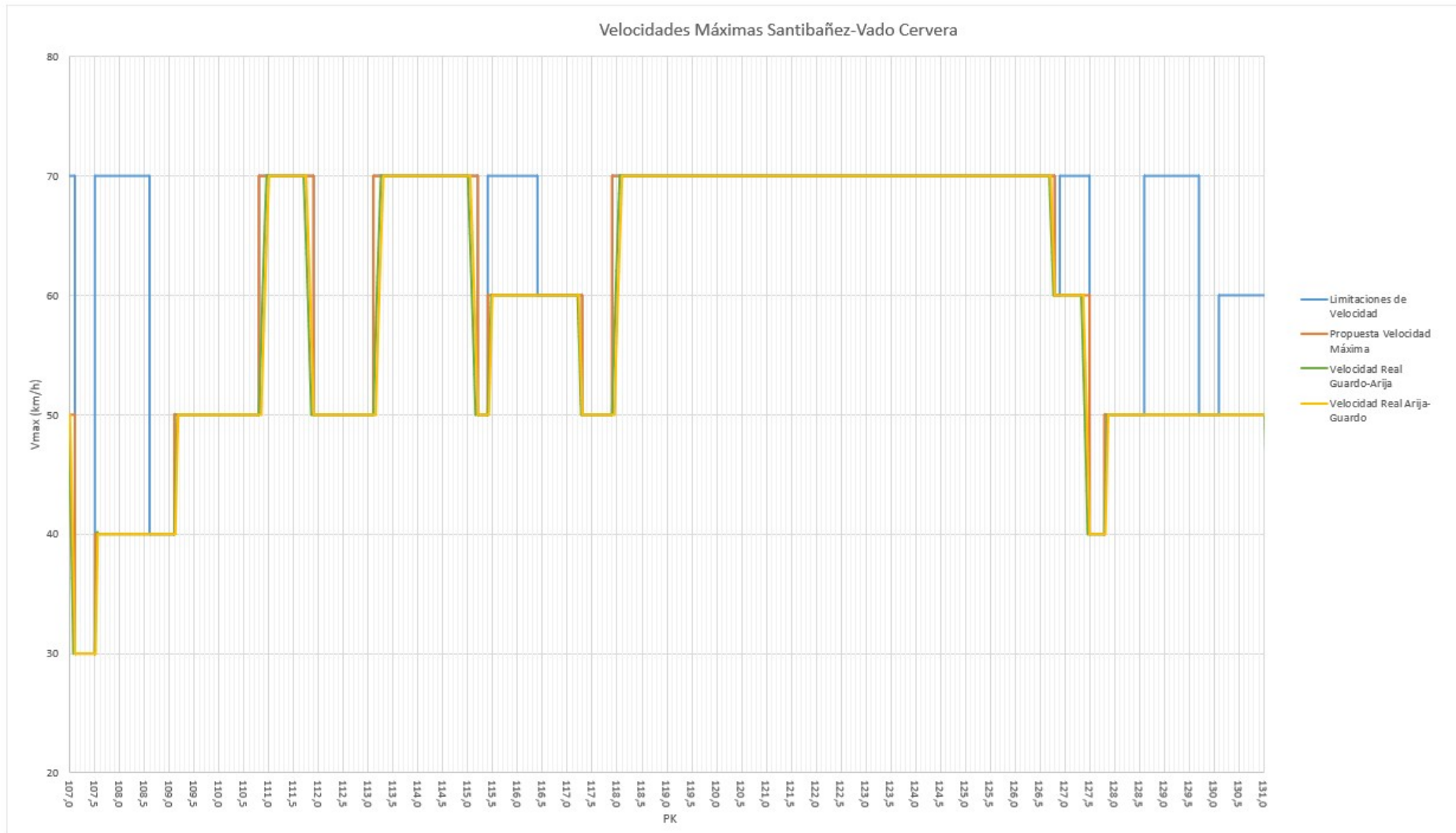


Gráfico 1.2: Cuadro Velocidades Máximas Santibañez de la Peña-Vado Cervera

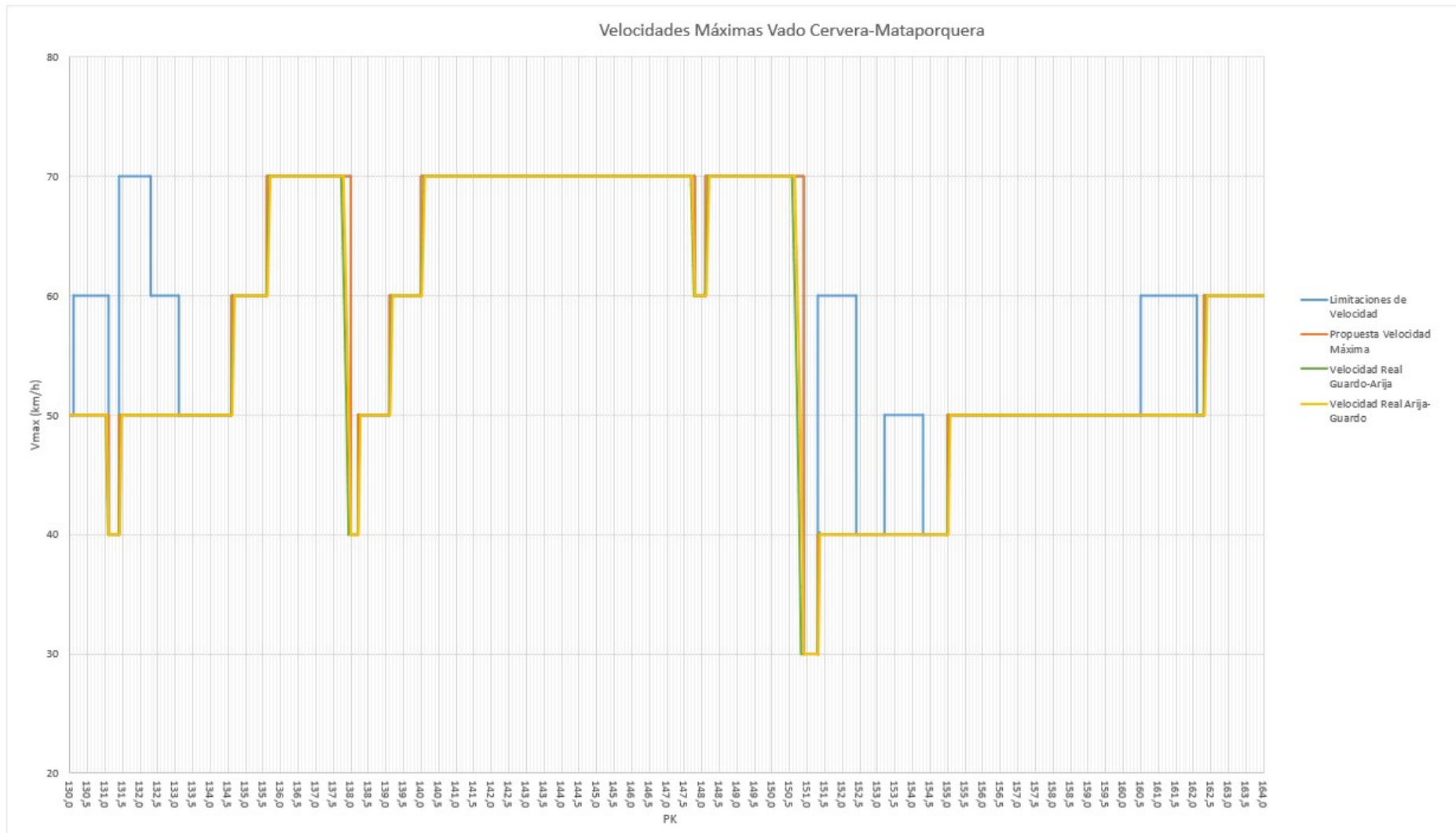


Gráfico 1.3: Cuadro Velocidades Máximas Vado Cervera-Mataporquera

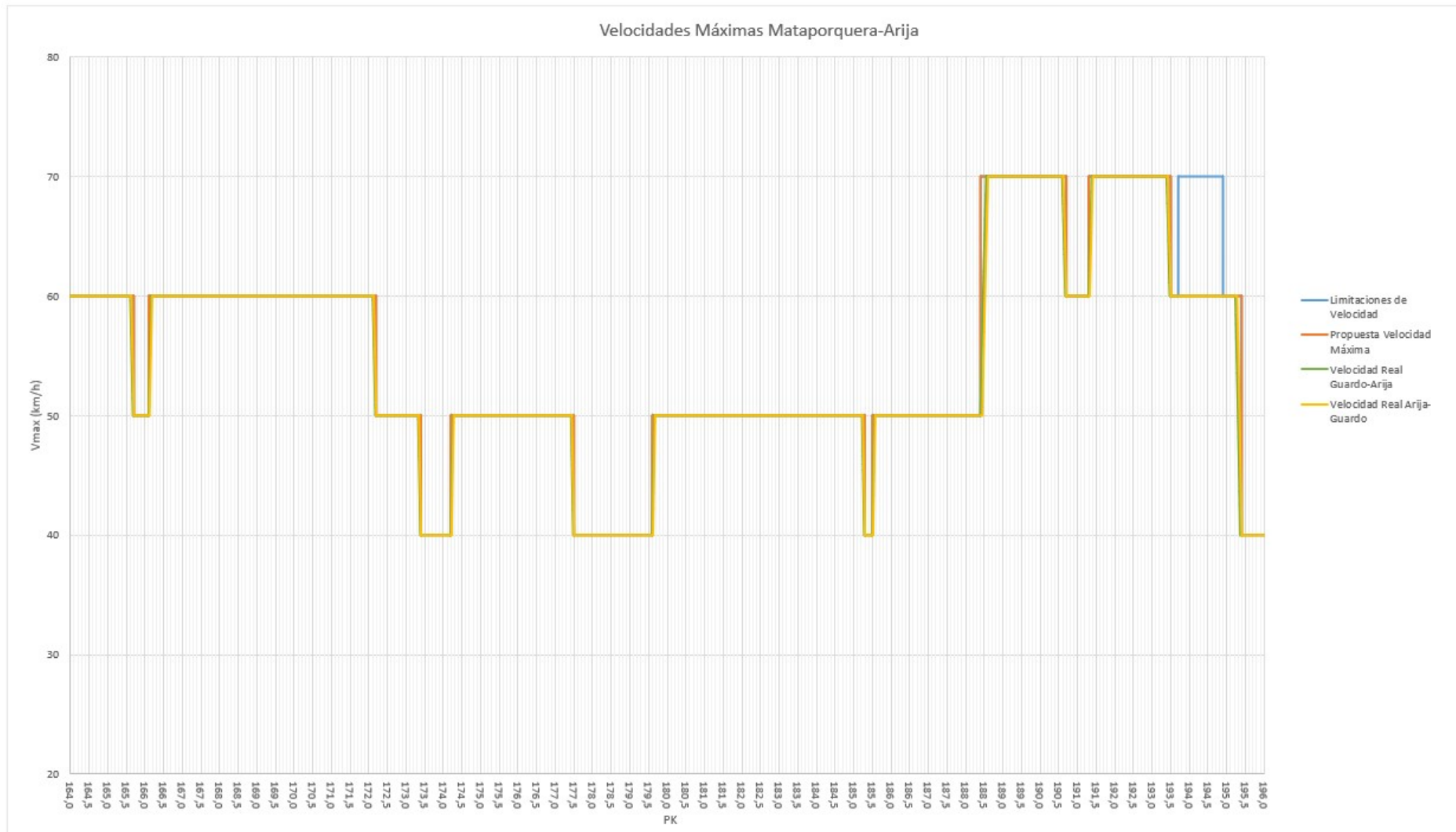


Gráfico 1.4: Cuadro Velocidades Máximas Mataporquera-Arija

Distancia de Frenado

Por último, se han establecido las zonas de frenado en el tramo. Estas zonas de frenado atienden a las restricciones de velocidad propuestas mencionadas en el apartado anterior.

Para el cálculo de marcha se han determinado las distancias de acuerdo a los cambios de velocidad definidos, teniendo en cuenta la reducción de perfiles establecida en el tramo anterior.

Sin embargo, para el posicionamiento de balizas, como explicaremos en el apartado 6, las distancias para determinar si un punto es una zona de frenado o no se han empleado las distancias de frenado para realizar una parada antes de los puntos de peligro. Los puntos considerados han sido las señales de acceso a los diferentes cantones, tanto físicas como virtuales.

Para ello, se ha utilizado la fórmula y los valores establecidos en la ETI relativa al subsistema “Material Rodante”[11], la cual establece que la distancia de parada debe calcularse según la siguiente fórmula:

$$S = V_0 \times t_e + \frac{V_0^2 - V_1^2}{2ab_1} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2ab_2} + \dots + \frac{V_n^2}{2ab_n}$$

Donde:

S: Distancia de parada (m)

V0: Velocidad Inicial (m/s)

te: Tiempo equivalente de retardo de la aplicación (s)

V1...Vn: velocidad indicada en la tabla X. (m/s)

ab1...abn: deceleración especificada en la banda de aceleraciones considerada (m/s²)

Y los valores de deceleración y tiempo de retardo se obtienen del cuadro 4.1.5c de la ETI[11]:

Cuadro 4.1.5c

| Modo de frenado | t _e [s] | Deceleración mínima en las condiciones de frenado predeterminadas [m/s ²] | | | |
|--|-----------------------|---|-------------------|-------------------|-----------------|
| | | 330-300 (km/h) | 300-230 (km/h) | 230-170 (km/h) | 170-0 (km/h) |
| Caso A: frenado de emergencia con determinados equipos aislados | 3 | 0,85 | 0,9 | 1,05 | 1,2 |
| Caso B: frenado de emergencia con determinados equipos aislados y condiciones climáticas desfavorables | 3 | 0,65 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |

t_e[s]= Tiempo equivalente de retardo de la aplicación.

Se ha comprobado que las distancias de frenado máximas calculadas no exceden las especificadas en las norma[11] (cuadro 4.1.5d):

Cuadro 4.1.5d

| Modo de frenado | t_e [s] | Las distancias de frenado no deben ser superiores a [m] | | | |
|--|--------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | 330-0 (km/h) | 300-0 (km/h) | 250-0 (km/h) | 200-0 (km/h) |
| Caso A: frenado de emergencia con determinados equipos aislados | 3 | 4 530 | 3 650 | 2 430 | 1 500 |
| Caso B: frenado de emergencia con determinados equipos aislados y condiciones climáticas desfavorables | 3 | 5 840 | 4 690 | 3 130 | 1 940 |

Los resultados de estos cálculos se muestran en el Anexo 1 “Guardo-Arija_SGT.xlsb”.

5. Análisis de la señalización ferroviaria y su localización

Como se ha comentado anteriormente en la descripción de la línea, la línea se opera mediante Bloqueo Telefónico, las estaciones terminales (Guardo y Arija) están equipadas mediante Circuitos de Vía y tienen las señales protegidas mediante el sistema ASFA.

Sin embargo, en el resto de interestaciones intermedias nos encontramos que no cuentan con circuitos de vía y que solo tienen Señales de Avanzada y de Entrada a la estación. Así mismo los apeaderos no disponen de ningún tipo de señalización, excepto el apeadero de Guardo, que debido a su cercanía a la estación de Guardo está protegido y con Circuitos de vía que dependen de la señalización de la estación de Guardo.

Se ha recogido la posición de las diferentes señales, ya que estas señales se emplearán como puntos de cantonamiento de la vía en el sistema ERTMS N2 y de referencia para el posicionamiento de las balizas:

| ID Señal | Tipo Señal | Tramo/Estación | Sentido | PK |
|------------|--------------|---------------------------|---------|---------|
| E1_GU | Entrada | Guardo | Impar | 97,763 |
| R2_GU | Retroceso | Guardo | Par | 97,801 |
| E4_GU | Entrada | Guardo | Par | 98,056 |
| S1_GU | Salida | Guardo | Impar | 98,37 |
| E2_GU | Entrada | Guardo | Par | 98,675 |
| E'2_GU | Avanzada | Guardo | Par | 99,47 |
| SF1_PN175 | Paso a Nivel | Guardo-Santibañez | Impar | 101,95 |
| SF2_PN175 | Paso a Nivel | Guardo-Santibañez | Par | 102,05 |
| E'1_SP | Avanzada | Santibañez de la Peña | Impar | 106,238 |
| E1_SP | Entrada | Santibañez de la Peña | Impar | 106,736 |
| SF1_PN187 | Paso a Nivel | Santibañez de la Peña | Impar | 106,789 |
| SF2_PN187 | Paso a Nivel | Santibañez de la Peña | Par | 106,978 |
| E2_SP | Entrada | Santibañez de la Peña | Par | 107,689 |
| E'2_SP | Avanzada | Santibañez de la Peña | Par | 108,203 |
| SF1_PN217 | Paso a Nivel | Santibañez-Vado Cervera | Impar | 119,335 |
| SF2_PN217 | Paso a Nivel | Santibañez-Vado Cervera | Par | 119,405 |
| SF1_PN219 | Paso a Nivel | Santibañez-Vado Cervera | Impar | 120,27 |
| SF2_PN219 | Paso a Nivel | Santibañez-Vado Cervera | Par | 120,305 |
| SF1 PN 230 | Paso a Nivel | Santibañez-Vado Cervera | Impar | 125,99 |
| SF2 PN 230 | Paso a Nivel | Santibañez-Vado Cervera | Par | 126,04 |
| E'1_VC | Avanzada | Vado Cervera | Impar | 130,005 |
| E1_VC | Entrada | Vado Cervera | Impar | 130,609 |
| E2_VC | Entrada | Vado Cervera | Par | 131,368 |
| E'2_VC | Avanzada | Vado Cervera | Par | 131,9 |
| SF1 PN 262 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Impar | 143,387 |
| SF2 PN 262 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Par | 143,447 |
| SF1 PN 269 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Impar | 146,667 |
| SF2 PN 269 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Par | 146,717 |
| SF1 PN 273 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Impar | 148,422 |

| ID Señal | Tipo Señal | Tramo/Estación | Sentido | PK |
|------------|--------------|---------------------------|---------|---------|
| SF2 PN 273 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Par | 148,472 |
| SF1 PN 285 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Impar | 155,023 |
| SF2 PN 285 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Par | 155,074 |
| SF1 PN 296 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Impar | 159,573 |
| SF2 PN 296 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Par | 159,625 |
| SF1 PN 303 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Impar | 162,167 |
| SF2 PN 303 | Paso a Nivel | Vado Cervera-Mataporquera | Par | 162,212 |
| E'1_MP | Avanzada | Mataporquera | Impar | 162,806 |
| E1_MP | Entrada | Mataporquera | Impar | 163,596 |
| E2_MP | Entrada | Mataporquera | Par | 164,759 |
| E'2_MP | Avanzada | Mataporquera | Par | 165,26 |
| E'1_LC | Avanzada | Los Carabeos | Impar | 172,835 |
| E1_LC | Entrada | Los Carabeos | Impar | 173,314 |
| E2_LC | Entrada | Los Carabeos | Par | 174,243 |
| E'2_LC | Avanzada | Los Carabeos | Par | 174,743 |
| SF1 PN 329 | Paso a Nivel | Los Carabeos-Arija | Impar | 175,513 |
| SF2 PN 329 | Paso a Nivel | Los Carabeos-Arija | Par | 175,563 |
| SF1 PN 341 | Paso a Nivel | Los Carabeos-Arija | Impar | 182,255 |
| SF2 PN 341 | Paso a Nivel | Los Carabeos-Arija | Par | 182,310 |
| E'1_AR | Avanzada | Arija | Impar | 194,365 |
| E1_AR | Entrada | Arija | Impar | 195,36 |
| R1_AR | Retroceso | Arija | Impar | 195,625 |
| S2/1_AR | Salida | Arija | Par | 195,69 |

Tabla 3: Señales del tramo Guardo-Arija

Como se puede observar en la tabla únicamente las estaciones terminales cuentan con señales de salida, las estaciones intermedias únicamente cuentan con señales de entrada y avanzada, por ello las diferentes Autoridades de Movimiento definidas se darán de baliza de Entrada de la Estación a la Señal de Entrada de las estación siguiente.

Mediante la herramienta de visualización se ha procedido a obtener la posición, y por tanto las coordenadas de la señalización expuesta en la Tabla 3.

Para ello se ha realizado un recorrido visual del tramo y se han marcado dichas señales:

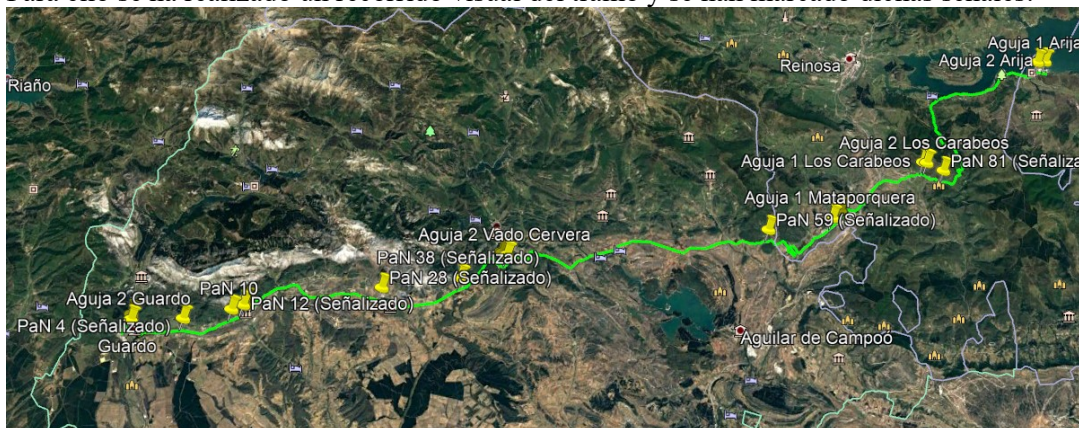


Imagen 6. Localización de la Señalización Existente

A continuación se ha procedido a la división de los tramos entre las estaciones intermedias en diferentes secciones. En los extremos de estas secciones se han establecido los marcadores que deben colocarse a una distancia entre 3000 y 5000 metros de la señal previa o del marcador anterior según el documento ERTMS requirements for a low density line with VBs [12].

Estas reglas establecen que se debe dividir la vía en diferentes secciones divididas por las señales de la vía (Entrada y Salida de Estaciones) o de Señales virtuales. Los marcadores (MarkerBoards) de cada cambio de sección se deben situar a 5 metros del punto que se determine como el divisorio entre ambas secciones, que llamaremos Connectors.

En las estaciones se considera a 5 metros de la señal de Entrada o de Salida.

Las coordenadas de cada punto de cada sección pueden consultarse en el Anexo 2 “GA_trackmap1” y los datos del punto donde se ha dividido cada sección, su longitud y su punto kilométrico en el Anexo 3 “GA_topology”.

En cada cambio de sección se han establecido dos señales virtuales a cada lado para marcar el acceso al cantón. Estas señales se pueden consultar en el Anexo 4 “GA_trackelements_ERTMS1”.

6. Localización de las balizas y las balizas virtuales de acuerdo a los datos de vía

Para la localización de las Eurobalizas, tanto físicas como virtuales se han tenido en cuenta las Reglas de Ingeniería definidas por el CEDEX recogidas en el documento: ERTMS requirements for a low density line with VBs [7].

6.1. Balizas Físicas

Este documento especifica que de acuerdo al apartado 5.1 del documento “Enhanced Functional ERTMS Architecture Capable of using GNSS and Public Radio TLC Technologies”[15], el grupo principal de balizas de las señales de entrada y salida de una estación deben ser dos balizas físicas para permitir la inicialización del sistema de seguimiento satelital y asegurarse de que los telegramas con información relacionada con la seguridad sean correctamente recibidos y procesados.

Estas dos balizas físicas deben colocarse a una distancia de entre 10 y 15 metros del punto que se ha considerado como divisorio de las secciones

6.2. Balizas Virtuales

Se debe tener en cuenta que todo el tramo entre estaciones debe ser equipado con balizas virtuales y que estas en estas balizas no pretenden incluirse información adicional más que mensajes de texto.

Previo a su posicionamiento se deben definir una secciones separadas por unos marcadores (MarkerBoards) que servirán para dividir la vía en distintos secciones (ver apartado 7).

Dentro de las balizas virtuales se distinguen dos tipos de Balizas, las Balizas principales y las balizas de localización.

Las balizas principales, se instalarán en grupos de dos y ambas pertenecerán el grupo principal de balizas. Estas balizas se instalarán al final de cada sección en ambos sentidos, a una distancia de 10 y 15 metros del punto de unión, que se situará a 5 metros después del marcador.

Como aclaración cuando un tren se aproxime a uno de estos puntos de sección deberá encontrarse la primera baliza del grupo, a 5 metros la siguiente baliza, 5 metros más adelante pasará por el punto como denominado marcador y el final de la sección a 5 metros.

El otro tipo de balizas, las balizas de localización se deberán posicionar según el siguiente criterio:

Si el siguiente grupo de balizas se encuentra en una zona de frenado, por motivos de reducción de velocidad, se emplazará a una distancia de entre 200 y 500 metros

Si el siguiente grupo de balizas no se encuentra en una zona de frenado, la distancia debe ser entre 500 y 1000 metros.

En las estaciones, estas balizas se deben situar a 35 metros del final del andén de vía.

Una vez establecidos los criterios para su posicionamiento teórico, hay un requisito adicional a tener en cuenta derivado del sistema de localización, e implica que las balizas deben instalarse en puntos en los que la señal del sistema GNSS sea correcta.

En la localización se ha tenido en cuenta la existencia de elementos observados a simple vista para evitar colocar las Balizas Virtuales en puntos que pudieran tener afección a la señal GNSS, por ello se ha evitado la instalación de Balizas Virtuales en túneles, pasos sobre elevados, viaductos, cercanos a viaductos metálicos. No obstante para la implementación de este diseño se debe hacer una campaña de medidas en vía para determinar la calidad de la señal GNSS, que no entra en el alcance de este proyecto.

6.3. Resultados

Teniendo en cuenta estos requisitos definidos para el uso de un sistema ERTMS con Balizas Virtuales, se ha procedido a dividir la vía en diferentes secciones de acuerdo a la longitud máxima de cada sección y las características de la vía.

Se han definido las balizas o grupo de balizas para cada sentido de circulación siendo muchas de ellas comunes y otras específicas.

Se ha determinado la distancia (offset) de cada baliza al comienzo de la sección a la que pertenece y se le han asignado las coordenadas correspondientes.

El criterio para denominar el ID de las balizas ha sido el siguiente:

- ID < 1000: Eurobalizas Fijas
- ID >1000: Eurobalizas Virtuales
- ID 1XXX: Eurobalizas del grupo principal de balizas en sentido nominal
- ID 2XXX: Eurobalizas del grupo principal de balizas en sentido inverso
- ID 3XXX: Eurobalizas de Relocalización
- ID_XXXX_00: Primera Baliza grupo de Balizas XXXX
- ID_XXXX_01: Segunda Baliza grupo de Balizas XXXX

Las Eurobalizas Virtuales de Localización previas a las balizas principales fijas o virtuales se han denominado con un ID cuya terminación es similar al ID de la baliza a la que anuncia.

El resultado se muestra en el Anexo 4 “GA_Trackelements_ERTMS1”.

7. Definición de los Datos ERTMS

Para esta parte del proyecto se ha tomado como base los requerimientos definidos en las Reglas de Ingeniería definidas por el CEDEX recogidas en el documento: ERTMS requirements for a low density line with VBs [7].

Según el mismo se deben definir las autoridades de movimientos para circular en los siguientes modos para trenes equipados con las versiones 2.3.0d y 3.6.0.

Se ha optado por generar los datos de manera que el sistema ERTMS divida el tramo de línea en 6 secciones. En cada sección el EVC a bordo recibirá los datos en forma de los siguientes paquetes definidos en el SUBSET-026 “System Requirements Specification” [8].

Cada grupo de paquetes se enviarán al EVC antes de la llegada a la primera baliza de cada sección. Estas secciones se han establecido entre las estaciones existentes y según las limitaciones impuestas por los requisitos del sistema.

Según el SUBSET-026 en el punto 7, donde especifica los paquetes de datos del sistema ERTMS, establece que los paquetes de datos no podrán contar con más de 31 valores de la misma variable, es decir, no podrán transmitir en un paquete el mismo tipo de información más de 31 veces. En el tramo entre las estaciones entre Vado Cervera y Mataporquera se ha tenido que dividir la autoridad de Movimiento en dos partes, debido a que el número de balizas del paquete 5 (información de enlace) es superior en este tramo.

Por lo tanto, los el EVC deberá recibir los datos a vía radio antes de la llegada del tren a los siguientes puntos en sentido nominal:

- ID 1: Señal S1 Guardo / Baliza ID 100 / PK 98/360
- ID 2: Señal E1 Santibañez de la Peña / Baliza ID 102 / PK 106/726
- ID 3: Señal E1 Vado Cervera / Baliza ID 104 / PK 130/599
- ID 4: Señal Virtual S3003VC / Baliza ID 1016 / PK 146/363
- ID 5: Señal E1 Mataporquera / Baliza ID 106 / PK 163/590
- ID 6: Señal E1 Los Carabeos / Baliza ID 108 / PK 173/304

En sentido inverso serían los siguientes puntos:

- ID 7: Señal S2/1 Arija / Baliza ID 200 / PK 195/695
- ID 8: Señal E2 Los Carabeos / Baliza ID 202 / PK 174/253
- ID 9: Señal E2 Mataporquera / Baliza ID 204 / PK 164/769
- ID 10: Señal Virtual S3002VC / Baliza ID 2018 / PK 146/363
- ID 11: Señal E2 Vado Cervera / Baliza ID 206 / PK 131/378
- ID 12: Señal E2 Santibañez de la Peña / Baliza ID 108 / PK 107/699

Antes de alcanzar las posiciones definidas anteriormente el EVC debe haber recibido y procesado la información que se va a desarrollar en los siguientes apartados. A continuación se realizará una descripción de las variables, su interpretación y el valor adoptado. Junto a este valor se aportará una explicación de por qué se han elegido los valores más representativos de cada paquete de datos.

Todos los datos de los diferentes paquetes que se han definido y se explican a continuación pueden encontrarse en el Anexo 6 “ERTMS_DATA” en aquellas pestañas con el mismo nombre.

Autoridad de movimiento (Packet 15)

La autoridad de movimiento es el paquete principal del sistema ERTMS. Establece la distancia que se le permite avanzar al tren.

Para ello el sistema ERTMS necesita recibir a través del sistema de radio un mensaje que contenga las siguientes variables:

NID_PACKET: Número identificación del paquete

L_PACKET: Longitud del paquete en bits. Esta variable no se ha definido debido a que se genera automáticamente mediante los programas de transmisión de datos.

Q_DIR: Dirección de marcha (01 Nominal / 02 Inverso)

Q_SCALE: Escala de los datos (0: 10 centímetros / 1: 1 metro / 2: 10 metros / 3: Reserva)

V_EMA: Velocidad al final de la Autoridad de Movimiento (intervalo de 5 km/h)

N_ITER: Número de iteraciones de las variables

L_SECTION: Longitud de la Autoridad de Movimiento

Q_DANGERPOINT: Calificador para describir el punto de peligro (0: no hay información del punto de peligro / 1: Si existe un punto de peligro o se ha especificado una velocidad de liberación)

D_DP: Distancia al punto de peligro desde el fin de la Autoridad de Movimiento

V_RELEASEDP: Velocidad de liberación asociada al punto de peligro (intervalo de 5 km/h / 127: Valores nacionales)

Información de enlace (Packet 5)

El paquete 5 se envía junto a la autoridad de movimiento para proporcionar al EVC la información sobre el grupo de balizas que el tren deberá encontrarse en la Autoridad de Movimiento correspondiente. Según las reglas de Ingeniería[7] los grupos de balizas principales (a pie de señal) y las de entrada en un cantón deben estar compuestas por un grupo de balizas de dos balizas (físicas o virtuales) y que los grupos de balizas de relocalización estarán compuestos únicamente por un grupo de balizas de una baliza virtual.

D_LINK: Distancia al siguiente grupo de balizas

Q_NEWCOUNTRY: Indica si el siguiente grupo de balizas se encuentra en un país diferente (0: Mismo País / 1: País Diferente)

NID_BG: Numero de identidad del grupo de balizas (definido según la Norma Adif de Señalización NAS 840. Requisitos funcionales y reglas de Ingeniería ERTMS Nivel 1 y 2.[13])

Q_LINKORIENTATION: Dirección del grupo de balizas (0: Dirección inversa / 1: Dirección Nominal)

Q_LINKREACTION: Reacción en caso de pérdida o inconsistencia de la información de enlace o de el grupo de balizas. (00: Frenado de Emergencia / 01: Aplicar Freno de Servicio / 10: Sin reacción / 11: Reserva). Para este parámetro se ha determinado que en caso de pérdida de un grupo de balizas el sistema a bordo debe aplicar el freno de servicio de acuerdo a lo especificado en el SUBSET-026 3.16.2.7.1.

Q_LOCACC: Precisión de la localización de balizas. Se ha empleado el requisito 2.2.1.7 definido según la Norma Adif de Señalización NAS 840. Requisitos funcionales y reglas de Ingeniería ERTMS Nivel 1 y 2.[13]) el cual establece que la precisión debe ser máximo un 1% de la distancia de enlace definida por D_LINK.

Perfil de Gradiente (Packet 21)

El perfil de gradiente se ha calculado en base a la diferencia de altura sobre el nivel del mar metro a metro. Una vez calculado se ha examinado el perfil de gradiente estudiando donde se producen los diferentes puntos de acuerdo de la vía y se ha dividido el tramo en secciones entre acuerdos.

Dividido el tramo por rampas ascendentes y descendentes se han asignado a su correspondiente autoridad de movimiento y se ha incluido en los datos el valor calculado en el Anexo. Esta pendiente es la pendiente física, no tiene en cuenta las curvas ni su radio, pero debido a que el ERTMS emplea este dato para el cálculo de curvas de frenado no tendría influencia negativa en el cálculo de dichas curvas, ya que las curvas en pendientes negativas contribuirían a aumentar el rozamiento y su pendiente característica sería menor.

Las variables más relevantes son las siguientes:

D_GRADIENT: Distancia incremental al siguiente punto de cambio de gradiente

Q_GDIR: Calificador de la pendiente (0: rampa descendente / 1: rampa ascendente)

G_A(k): valor absoluto del gradiente entre dos puntos en tanto por mil

Para la determinación de los valores de estas variables se han empleados los datos calculados en la pestaña “Cálculo Pendiente” del Anexo Guardo-Arija_SGT.xlsb.

Perfil Estático De Velocidad (Packet 27)

El perfil estático de velocidad se ha tomado del Cuadro de Velocidades Máximas e Informaciones Permanente [14]. Se ha repartido entre las diferentes estaciones y se ha asociado al mismo que mensaje que las correspondientes Autoridades de Movimiento.

Como se indica en el apartado 4.3. Procesamiento de Datos Obtenidos. Limitaciones de Velocidad se han solapado zonas en las que hay un aumento de la velocidad permitida, siendo la velocidad menor la resultante del solapamiento, en distancias en las que dicho aumento es una longitud pequeña.

Las variables empleadas definidas para este paquete son:

D_STATIC: Distancia al siguiente perfil estático de velocidad

V_STATIC: Velocidad del Perfil Estático de Velocidad

Q_FRONT: Calificador que indica si el límite de velocidad se debe aplicar hasta que la parte frontal del tren o la parte trasera del tren ha abandonado el elemento. (0: Validez hasta que el final del tren ha abandonado el perfil / 1: Validez desde que la parte frontal del tren abandona el perfil.)

Para el parámetro Q_FRONT, se ha determinado que se debe aplicar el valor 1, es decir, toma validez el siguiente perfil de velocidad según la parte frontal del tren abandona dicho perfil.

Perfil de modo (Packet 80)

El perfil de modo de operación asociado a una Autoridad de Movimiento es una característica que puede ser elegida por el maquinista o impuesta por las condiciones de vía. El perfil de modo impuesto por la vía es aquel que ante ciertas situaciones la vía puede ordenar al sistemas ERTMS a bordo la transición a estos modos debido a que la supervisión que provee el ERTMS no es completa. Los modos que la vía puede ordenar transicionar al ETCS son los siguientes:

- Shunting (SH)
- Limited Supervision (LS)
- On sight (OS)

El modo Shunting (SH) es el empleado para autorizar al tren a la realización de maniobras. En este modo el ERTMS solo supervisa el tren frente a una velocidad máxima establecida para realizar maniobras, una lista de grupos de balizas esperados o mensajes de las balizas que indican frenados de emergencia en caso de operación en el modo Shunting.

El modo Limited Supervision (LS) habilita al tren a operar en zonas en las que la información de vía pueda ser empleada para realizar una supervisión secundaria del tren, supervisando los movimientos del tren frente a un perfil dinámico de velocidad, utilizando la velocidad más restrictiva a terminar entre la posición del tren y el final de la Autoridad de Movimiento o la velocidad objetivo del fin de la autoridad de movimiento.

El modo On Sight se debe emplear en aquellas zonas en las que pudiese haber obstáculos en la vía, como pasos a nivel sin proteger o zonas sin vallado. También puede darse el caso en el que el circuito de vía esté ocupado. Este modo ha sido el elegido para la entrada en estaciones y el cruce de pasos a nivel.

Se ha establecido que 400 metros antes de la baliza de relocalización más próxima a dichos pasos a nivel o de las balizas de entrada a las estaciones el maquinista debe reconocer la entrada en el modo On Sight, en el cuál deberá respetar la señalización lateral y además comprobar que el tramo se encuentra despejado. Así podemos conseguir que el maquinista tenga tiempo de reconocer la entrada en este modo antes de la aplicación del freno de servicio por parte del ERTMS a bordo, ya que en cuanto comienza la distancia definida para el reconocimiento el equipo de abordaje aplica la curva de frenada necesaria para parar el tren antes del punto escogido para la entrada en modo On Sight.

Las principales variables que definen este modo son las siguientes:

D_MAMODE: Distancia dentro de la Autoridad de Movimiento a la que comienza el modo de operación

M_MAMODE: Modo de Operación (00: On Sight / 01: Shunting / 10: Limited Supervision / 11: Reserva)

V_MAMODE: Velocidad para el modo de Operación (resolución de 5 km/h. 127: Valores nacionales). En este caso se ha seleccionado el valor 127 para que el maquinista deba respetar la señalización lateral para la aproximación a las señales de entrada y de paso a nivel.

L_MAMODE: Longitud del modo

L_ACKMODE: Longitud de reconocimiento por parte del maquinista antes del punto en el que el modo se empieza a aplicar.

Q_MAMODE: (0: deriva la longitud y posición del tramo supervisado de la autoridad de movimiento / 1: El comienzo de la zona supervisada empieza en el punto en el que se ha definido en el paquete) En nuestro caso se ha empleado el valor 1 debido a que la supervisión comienza y acaba dentro de una misma autoridad de movimiento, la cual se ha definido de una señal de entrada hasta la siguiente, por lo que los pasos a nivel que se encuentre el tren deben tenerse en cuenta.

8. Prueba de interoperabilidad con un EVC en Laboratorio

Debido a un retraso en la ejecución y al gran volumen de datos utilizados para este trabajo no ha habido tiempo para la realización de una simulación de marcha en un laboratorio con un equipo real.

Esta simulación, se realizaría en el Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX, primero en el mundo acreditado para ensayar componentes y líneas equipadas con ERTMS.

Este laboratorio también proporciona la posibilidad de ensayar la funcionalidad e interoperabilidad de la línea ejecutando en el mismo la batería de ensayos necesarios para su puesta en marcha, dando así soporte a Adif y Renfe Operadora en el proceso de puesta en servicio de nuevas líneas y trenes equipados con el estándar europeo.

Esto se consigue introduciendo en el laboratorio los componentes de vía ERTMS, y su conexión al simulador de Tráfico del CEDEX que replica por ordenador la topología de vías, desvíos, circuitos de vía y señales de la línea, y en paralelo se integra el equipo embarcado ERTMS o EVC que se conecta al simulador del movimiento del tren del laboratorio.

También participa en estudios especiales, como la viabilidad de la eurobaliza para vías de tres carriles, y está inmerso en varios proyectos europeos de utilización del sistema satélite Galileo para la implantación de balizas virtuales en las líneas ERTMS.

9. Estudio comparativo con un sistema ERTMS Nivel 2 Convencional

Como se definía en el apartado de introducción el sistema ERTMS de Nivel 2 debe contar con una serie de equipos instalados los cuales deben actuar entre ellos.

Por un lado, los trenes que circulen con el sistema ERTMS deben estar equipados con el sistema ETCS. Este sistema, a grandes rasgos cuenta con diferentes equipos que se listan a continuación:

- Un EVC (European Vital Computer)
- Un sistema de Odometría para la localización del tren
- Un sistema de lectura de balizas en vía que consta de una o más Euroantenas y un módulo de transmisión de la información BTM (Balise Transsmision Module)
- Un sistema de comunicación vía radio GSM/GSM-R

Además se debe equipar la vía con los siguientes equipos:

- Un equipo de comunicación vía radio o RBC (Radio Block Communication)
- Un equipo de gestión de los enclavamientos o IXL
- Las Eurobalizas empleadas para la transmisión de información de la vía al tren

Todos estos equipos llevan asociado un sistema de certificación muy complejo el cuál depende para cada ancho de vía. Las diferencias del ancho de vía es un tema de gran complejidad y relevancia como se puede apreciar en el artículo publicado por el CEDEX “Metodología para el estudio de las desviaciones laterales admisibles en el emplazamiento de Eurobalizas en vías de tres carriles”[17]. Esto implica que la adaptación del sistema ERTMS a vía diferentes del ancho convencional requiere de un análisis en profundidad de la posición de las balizas respecto a las vías.

El sistema descrito en este trabajo, empleando Balizas Virtuales, reduce significativamente los problemas derivados de los anchos de vía. Por supuesto, también supone una reducción drástica de los costes de instalación y mantenimiento teniendo en cuenta que en este proyecto, para una longitud aproximada de 100 kilómetros se ha requerido de la utilización de 197 balizas, de las cuales sólo 24 son balizas físicas. Implica una reducción del 87% de las balizas a instalar y posteriormente su mantenimiento.

Además, en caso de modificación de la posición de las balizas por algún motivo, sería mucho más fácil, puesto que los cambios serían a nivel de datos y certificación únicamente.

Por otra parte, la modificación necesaria en el material rodante equipado con ETCS de nivel 2 convencional implicaría solamente la instalación del equipo VBR (Virtual Balise Reader), el cuál sería un equipo conectado al EVC.

Se estima que el coste del sistema ERTMS en función de los diferentes contratos adjudicados se ha reducido de 350.000 € /km a 120.000€/km en los últimos contratos de implementación en diferentes líneas. Para cumplir con los objetivos de costes del Plan Nacional de Implementación del Sistema ERTMS en España se debe reducir aún más el coste del mismo.

Es por ello que esta alternativa parece una opción viable con prestaciones muy similares a un sistema ERTMS de nivel 2 convencional.

10. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Conclusiones

Como podemos apreciar en el desarrollo del trabajo la mayor parte de él se ha realizado con especificaciones y reglas de ingeniería definidas para sistemas de ERTMS Nivel 2 Convencional, lo que asegura la interoperabilidad del sistema así como la base para argumentar que el desarrollo de las Balizas Virtuales no implicaría un desarrollo de un sistema nuevo y las desventajas asociadas.

El sistema de posicionamiento mediante sistema GNSS es un proyecto Europeo con gran desarrollo actualmente y que debido a la precisión actual de este tipo de sistemas, en el trabajo se han utilizado datos obtenidos con un intervalo de 1 metro de distancia, permite su aplicabilidad a entornos ferroviarios.

Además en el marco del desafío europeo de “Transporte inteligente, ecológico e integrado” existen varios proyectos en marcha proyectos donde se están desarrollando nuevas tecnologías, sensorización y metodologías en el ferrocarril (incluido el uso de tecnologías de posicionamiento por satélite) para mejorar la calidad de la información de localización e integridad de los trenes, al tiempo que se reducen los costes generales del ERTMS y, en particular, aquellos relacionados con los sistemas de detección de trenes convencionales en tierra (balizas, circuitos de vía o contadores de ejes).

En el caso particular de la tecnologías GNSS y con el objetivo de garantizar que la localización de las balizas virtuales se encuentran en zonas de buena calidad de recepción de señal de satélite se considera necesario realizar una campaña de medidas GNSS en campo considerando varios aspectos como la visibilidad de satélites, las interferencias o el fenómeno de múltiples trayectorias.

Por otra parte, como ventaja general del ERTMS frente a otros sistemas, es que es un sistema de protección automática del tren del tipo continuo, por lo que también concluimos que el nivel de seguridad que se le otorga a líneas instaladas con este sistema es sustancialmente mayor.

Debido a la importante reducción del coste descrita en el apartado 9, el empleo de Balizas Virtuales permitiría el uso más extensivo del sistema ERTMS, no solo en líneas de alta densidad de tráfico, sino en líneas como en la estudiada, cuyo tráfico es muy bajo y el empleo de este sistema podría ayudar a su revitalización y cumplimiento del Real Decreto 1011/2017 [18] en su artículo primero donde se recoge el siguiente texto:

“Los administradores de infraestructuras, con excepción de los puertos, deberán elaborar y llevar a cabo un Plan de Mejora de los Equipamientos de Seguridad en la red, consistente en la supresión de bloqueos telefónicos y en la dotación de un equipamiento mínimo en cuanto a sistemas de protección de tren, con objeto de minimizar progresivamente los riesgos derivados del factor humano en los procesos de circulación. Dicho Plan deberá ser presentado a la AESF antes del 15 de septiembre de 2018.

El Plan contemplará la supresión progresiva de los BT en las líneas donde se utilicen como bloqueo nominal y su sustitución por otros con menor intervención del factor humano.”

Aportaciones del TFM

Este trabajo aporta un estudio de la implementación de sistemas ERTMS empleando balizas virtuales en una línea regional de bajo tránsito, cuyos datos pueden emplearse para el conjunto de evidencias o ejemplos del desarrollo de este tipo de sistemas.

También ayuda a proponer formas de alcanzar la viabilidad de los objetivos definidos en el Plan Nacional de Implementación del ERTMS es España.

El trabajo toma como referencia distintos proyectos del programa “Horizonte2020” puesto en marcha por la Unión Europea, en concreto mediante la iniciativa Shift2Rail.

Dentro de esta iniciativa cabe destacar los proyecto GATE4Rail (GNSS Automated Virtualized Test Environment for RAIL) y ERSAT (ERTms + SATellite) en relación a la utilización de la tecnología GNSS en la señalización ferroviaria y el proyecto VITE (Virtualisation of the testing environment) para el contenido y forma de la digitalización de los datos de vía.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Union Agency for Railways, 2016, “ERTMS Making the railway system work better for society”.
- [2] “COMMISSION DECISION of 22.7.2009” amending Decision 2006/679/EC as regards the implementation of the technical specification for interoperability relating to the control-command and signalling subsystem of the trans-European conventional rail system.
- [3] Plan Nacional De Implementación ERTMS.
- [4] DIRECCIÓN GENERAL DE NEGOCIO Y OPERACIONES COMERCIALES, Dirección de Gabinete y Gestión Corporativa “Declaración sobre la Red 2021”.
- [5] DIRECCIÓN GENERAL DE NEGOCIO Y OPERACIONES COMERCIALES, Dirección de Gabinete y Gestión Corporativa “Declaración sobre la Red 2020”.
- [6] Deliverable 7.1 –Study of GNSS introduction in Rail, State of the Art Study and Adoption Roadmap Proposal, 31/08/2016.
- [7] CEDEX. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF). ERTMS Requirements for low density regional lines for: “Instalación Sistema ERTMS N2 con Balizas Virtuales”.
- [8] Subset-026 v3.6.0.
- [9] Adif. D.G. de Explotación y Construcción. Dirección Técnica. Subdirección de Programación de Instalaciones. Consigna A 3035 versión 13. “CTC BILBAO (RAM).”
- [10] Guardo-Arija_SGT.kml
- [11] DECISIÓN DE LA COMISIÓN de 30 de mayo de 2002 sobre la especificación técnica de interoperabilidad (ETI) relativa al subsistema «Material Rodante» del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad mencionado en el apartado 1 del artículo 6 de la Directiva 96/48/CE
- [12] CEDEX. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF).” ERTMS requirements for a low density line with VBs” 04 February 202112
- [13] ADIF. Dirección General de Explotación y Construcción. “Requisitos funcionales y reglas de Ingeniería ERTMS Nivel 1 y Nivel 2”. NAS840.2 Reglas Generales. Junio 2017
- [14] ADIF. Dirección General de Explotación y Construcción. Dirección de Planificación y Gestión de Red. Subdirección de Planificación y Gestión de la Capacidad. Red de Ancho Métrico. “Cuadro de Velocidades Máximas e Informaciones Permanentes.”Anejo I. Enero 2017
- [15] Enhancing railway signalling systems based on train satellite positioning, on-board safe train integrity, formal methods approach and standard interfaces, enhancing traffic management system functions
- [16] Renfe (2021). Horarios de Cercanías de líneas Feve Asturias, Bilbao, Cantabria, Ferrol Ortigueira, León Cistierna, Murcia. Disponible en: <https://www.renfe.com/es/es/cercanias/cercanias-feve/horarios> (acceso 01 julio 2021)
- [17] CEDEX. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF) José Bueno, Susana Herranz, Pedro Agudo, Alfredo Arroyo, Jorge Iglesias, Jaime Tamarit “Metodología para el estudio de las desviaciones laterales admisibles en el emplazamiento de Eurobalizas en vías de tres carriles”
- [18] Ministerio de Fomento.” Real Decreto 1011/2017, de 1 de diciembre, por el que se modifica el Real Decreto 664/2015, de 17 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Ferroviaria.”

12. ANEXOS

Los anexos pueden consultarse a través del siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/14POo1iz3q06Wdn0bzCIFSPR0c0XtnOaX?usp=sharing>

ANEXO I: Guardo-Arija_SGT.xls

ANEXO II: GA_trackmap1

ANEXO III: GA_topology

ANEXO IV: GA_Trackelements_ERTMS1

ANEXO V: Guardo-Arija_SGT.kml

ANEXO VI: ERTMS_DATA