

## PROYECTO FIN DE GRADO

**TÍTULO:** Análisis y Diseño de una Red de Comunicaciones Móviles FRMCS en una Línea de Alta Velocidad

**AUTOR/A:** Diego Simal Albiñana

**TITULACIÓN:** Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

**DIRECTOR/A:** Daniel de la Torre Lázaro (INECO)

**TUTOR/A:** Marta Gil Barba

**DEPARTAMENTO:** Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones

VºBº TUTOR/A

**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE/A:** Sofía Di Sarno García

**TUTOR/A:** Marta Gil Barba

**SECRETARIO/A:** Antonio Pérez Yuste

**Fecha de lectura:** 16/06/2025

**Calificación:**

El Secretario/La Secretaria,



---

## RESUMEN

### **Análisis y Diseño de una Red de Comunicaciones Móviles FRMCS en una Línea de Alta Velocidad**

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como finalidad el análisis y diseño de una red de comunicaciones móviles basada en el estándar FRMCS (*Future Railway Mobile Communication System*) para su implementación en un tramo de línea ferroviaria de alta velocidad comprendido entre Toledo y Talayuela. Este nuevo sistema de comunicaciones, impulsado por la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles) y desarrollado en colaboración con organismos internacionales, está destinado a sustituir al actual GSM-R (*Global System for Mobile Communications - Railway*), limitado por su base tecnológica 2G. El FRMCS, en cambio, se apoya en la arquitectura de red 5G, aportando mejoras significativas en términos de capacidad de transmisión, baja latencia, fiabilidad, ciberseguridad e interoperabilidad, aspectos fundamentales para garantizar la operación ferroviaria moderna y futura.

La red FRMCS no solo está orientada a cubrir las comunicaciones básicas de control y supervisión de trenes, sino también a habilitar servicios avanzados como videovigilancia en tiempo real, sistemas de información al pasajero, mantenimiento predictivo o conducción automática. En este contexto, el proyecto aborda el diseño conceptual y técnico de una infraestructura de red móvil basada en una arquitectura de doble capa de cobertura (Capa A y Capa B), orientada a garantizar cobertura continua, redundante a lo largo del trazado. Este diseño se ha desarrollado conforme a los criterios de planificación radioeléctrica establecidos por ADIF y los estándares EIRENE (*European Integrated Railway Radio Enhanced Network*), tanto en potencia recibida como a la disponibilidad porcentual sobre la vía. Para validar la propuesta, se ha empleado el software de simulación HTZ *Communications*, con el que se ha modelado el comportamiento radioeléctrico de la línea en distintos escenarios, con resultados que muestran que más del 95% del trazado cumple los umbrales mínimos, asegurando así una comunicación ferroviaria segura y eficiente.

El proyecto incluye también la planificación de la infraestructura de red fija, abarcando el tendido de fibra óptica, la red IP de transporte y el suministro energético necesario para garantizar la conectividad del sistema. De este modo se configura una red FRMCS completa, que integra tanto la capa radio como la red fija de soporte. Aunque el diseño se ha realizado sobre la banda de 1900 MHz, también se plantea la viabilidad de implantar la red en 900 MHz, especialmente en casos que requieran coexistencia con GSM-R o en líneas convencionales con condiciones de propagación más exigentes.

Finalmente, se concluye que el diseño propuesto es replicable en otras líneas ferroviarias, con posibilidad de adaptación a sus particularidades locales, como la orografía o la densidad urbana, y es compatible tanto con líneas de alta velocidad como con trazados convencionales.

**Palabras clave:** FRMCS, telecomunicaciones móviles ferroviarias, planificación radioeléctrica, alta velocidad, tramo Toledo - Talayuela

---

## ABSTRACT

### *Analysis and Design of a FRMCS Mobile Communications Network on a High-Speed Line*

The aim of this project is the analysis and design of a mobile communication network based on the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) standard, intended for deployment along a high-speed railway section between Toledo and Talayuela.

This new communication system, promoted by the UIC (International Union of Railways) and developed in collaboration with international bodies, is intended to replace the current GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway), which is limited by its 2G technological foundation. In contrast, FRMCS relies on 5G network architecture, offering significant improvements in transmission capacity, low latency, reliability, cybersecurity, and interoperability — all essential aspects for ensuring modern and future railway operations.

The FRMCS network is designed not only to support basic train control and supervision communications but also to enable advanced services such as real-time video surveillance, passenger information systems, predictive maintenance, and automated train operation. In this context, the project develops the conceptual and technical design of a mobile network infrastructure based on a dual-layer coverage architecture (Layer A and Layer B), aimed at ensuring continuous and redundant coverage along the route. This design has been developed according to radio planning criteria defined by ADIF and the EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network) standards, both in terms of received signal strength and coverage availability. To validate the proposal, the HTZ Communications simulation software was used to model the radio behavior of the line in various scenarios, with results showing that over 95% of the rail meets the required minimum thresholds, thereby ensuring safe and efficient railway communications.

The project also includes the planning of the fixed communication infrastructure, covering the deployment of fiber optics, the IP transport network, and the power supply system necessary to ensure full system connectivity. As a result, a complete FRMCS network is configured, integrating both the radio layer and the supporting fixed infrastructure. Although the technical design has been carried out in the 1900 MHz band, the 900 MHz band is also considered a viable alternative, particularly in scenarios requiring coexistence with GSM-R or on conventional railway lines with more demanding propagation conditions.

Finally, it is concluded that the proposed design is replicable in other railway lines, with the ability to adapt to specific local conditions, such as terrain or urban density, and is compatible with both high-speed and conventional railway corridors.

**Keywords:** FRMCS, railway mobile communications, radio planning, high-speed rail, Toledo – Talayuela section.

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Corredores principales de la Red RTE-T [9] .....	6
Figura 2. Red ferroviaria en España [12] .....	7
Figura 3. Frecuencias de las portadoras en la banda de GSM-R en MHz .....	11
Figura 4. Esquema FRMCS [23] .....	14
Figura 5. Organización de GSM-R y FRMCS [26].....	16
Figura 6. Arquitectura FRMCS [31].....	19
Figura 7. Posible migración de los servicios ETCS de GSM-R a FRMCS [32] .....	20
Figura 8. Arquitectura del Sistema MCX [42].....	21
Figura 9. Arquitectura Red 5GC [49] .....	23
Figura 10. Esquema de Capa Radio [53] .....	27
Figura 11. Espectro banda de 900 MHz [48].....	27
Figura 12. Espectro banda de 1900 MHz [48].....	27
Figura 13. Posible trazado de la línea de Alta Velocidad Toledo - Talayuela .....	30
Figura 14. Creación del proyecto.....	33
Figura 15. Parámetros de la estación base FRMCS.....	34
Figura 16. Patrón de radiación de las antenas .....	35
Figura 17. Relación entre niveles de cobertura y colores.....	38
Figura 18. Paleta de colores e intensidad de campo .....	38
Figura 19. Cobertura Radioeléctrica TOL-TAL Capa A (1).....	40
Figura 20. Cobertura Radioeléctrica TOL-TAL Capa A (2).....	41
Figura 21. Cobertura Radioeléctrica TOL-TAL Capa A (3).....	41
Figura 22. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (4).....	42
Figura 23. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (5).....	42
Figura 24. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (6).....	43
Figura 25. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (7).....	43
Figura 26. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (8).....	44
Figura 27. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (9).....	44
Figura 28. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (1).....	47
Figura 29. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (2).....	48
Figura 30. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (3).....	48
Figura 31. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (4).....	49
Figura 32. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (5).....	49
Figura 33. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (6).....	50
Figura 34. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (7).....	51
Figura 35. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (8).....	51
Figura 36. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (9).....	51
Figura 37. Esquema de la arquitectura de red fija FRMCS con topología en anillo redundante y doble plano.....	53
Figura 38. Desglose del presupuesto.....	59

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estrategia RTE-T: Objetivos y Plazos de Implementación .....	4
Tabla 2. Corredores principales de la Red RTE-T .....	5
Tabla 3. Anchos de vía en España .....	7
Tabla 4. Comparación de los principales parámetros técnicos entre GSM y GSM-R .....	10
Tabla 5. Requisitos de cobertura determinados por EIRENE .....	12
Tabla 6. Migración GSM-R a FRMCS .....	17
Tabla 7. Principales Funciones en la Arquitectura de Red 5G [47] .....	24
Tabla 8. Bandas de espectro para FRMCS en Europa .....	28
Tabla 9. Requisitos de rendimiento del sistema 5G [47] .....	29
Tabla 10. Resumen de emplazamientos Toledo - Talayuela Capa A .....	36
Tabla 11. Resumen de emplazamientos Toledo - Talayuela Capa B .....	45
Tabla 12. Presupuesto del personal del proyecto .....	57
Tabla 13. Presupuesto de licencia y material para la elaboración del proyecto .....	57
Tabla 14. Presupuesto del proyecto .....	58
Tabla 15. Presupuesto total del proyecto .....	59

---

## LISTA DE ACRÓNIMOS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5GC	<i>5G Core</i>
5G-R	<i>5G Rail</i>
ADIF	Administrador De infraestructuras Ferroviarias
AF	<i>Application Function</i>
AMF	<i>Access and Mobility Function</i>
ATO	<i>Automatic Train Operation</i>
AUSF	<i>Authentication Server Function</i>
AV	Alta Velocidad
AVE	Alta Velocidad Española
AWTF	<i>Architecture &amp; Technology Work Group</i>
BBU	<i>Baseband Unit</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BSS	<i>Base Station Subsystem</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CCTV	<i>Closed Circuit Television</i>
CEPT	Comité Europeo de Postas y Telecomunicaciones
CNAF	Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
CT	Centro de Transformación
CU	<i>Centralized Unit</i>
DL	<i>Downlink</i>
DU	<i>Distributed Unit</i>
ECC	<i>Electronic Communications Committee</i>
EIRENE	<i>European Integrated Railway Radio Enhanced Network</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>

---

ERC	<i>European Radiocommunications Comitee</i>
ERIG	<i>European Radio Implementors Group</i>
ERJU	<i>Europe’s Rail Joint Undertaking</i>
ERA	<i>European Union Agency for Railways</i>
ERTMS	<i>European Rail Traffic Management System</i>
ET	Edificio Técnico
ETCS	European Train Control System
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
FDD	<i>Frequency-Division Duplex</i>
FRMCS	<i>Future Railway Mobile Communication System</i>
FRS	<i>Functional Requirements Specification</i>
FWG	<i>Functional Work Group</i>
gNB	<i>Next Generation Node B</i>
GoA	Grado de Automatización
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GSM-R	<i>Global System for Mobile Communications – Railway</i>
IA	Inteligencia Artificial
IP	<i>Internet Protocol</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MCDATA	<i>Mission Critical Data</i>
MCPTT	<i>Mission Critical Push-to-Talk</i>
MCX	<i>Mission Critical Services</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MPLS	<i>Multiprotocol Label Switching</i>

---

MORANE	<i>Mobile Radio for Railways Network in Europe</i>
MS	<i>Mobile System</i>
NEF	<i>Network Exposure Function</i>
NF	<i>Network Function</i>
NR	<i>New Radio</i>
NRF	<i>Network Repository Function</i>
NSA	<i>Non-Standalone</i>
NSS	<i>Network and Switching Subsystem</i>
NSSF	<i>Network Slice Selection Function</i>
NWDAF	<i>Network Data Analytics Function</i>
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMSS	<i>Operation and Management Subsystem</i>
PCF	<i>Policy Control Function</i>
PEM	Presupuesto de Ejecución Material
PIS	<i>Passenger Information System</i>
PK	Punto Kilométrico
PM	Puesto de Mando
PTT	<i>Push-to-Talk</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAM	Red de Ancho Métrico
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RBC	<i>Radio Block Center</i>
RC	Red Convencional
RENFE	Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles
RF	Radio Frecuencia
RMR	<i>Railway Mobile Radio</i>
RRH	<i>Remote Radio Head</i>

---

RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
RTE-T	Red Transeuropea de Transporte
SA	<i>Standalone</i>
SBA	<i>Service-Based Architecture</i>
SMF	<i>Session Management Function</i>
SRS	<i>System Requirements Specification</i>
TC-RT	<i>Technical Committee Rail Telecom</i>
TCMS	<i>Train Control and Monitoring System</i>
TCU	<i>TransCoder Unit</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TF	<i>Task Force</i>
TOBA	<i>Telecom On-Board Architecture</i>
TT	Tren Tierra
TSI	<i>Technical Specifications of Interoperability</i>
UDM	<i>Unified Data Management</i>
UE	Unión Europea
UGFA	<i>UIC Groups for Frequency Aspects</i>
UIC	Unión Internacional de Ferrocarriles
UIT-R	Unión Internacional de Telecomunicaciones – Radiocomunicaciones
UL	<i>Uplink</i>
UNIFE	<i>Union des Industries Ferroviaires Européennes</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>

---

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	iv
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	ix
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos y Alcance Del Proyecto .....	1
1.2 Sistemas de Telecomunicaciones y Red Ferroviaria .....	3
1.3. Red Ferroviaria actual en España .....	6
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>9</b>
2.1 <i>Global System for Mobile Communications – Railway (GSM-R)</i> .....	9
2.1.1 Limitaciones del GSM-R .....	12
2.2 <i>Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)</i> .....	14
2.2.1 Descripción y Beneficios .....	14
2.2.2 Arquitectura.....	19
<b>3. ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO.....</b>	<b>30</b>
3.1 Marco Conceptual.....	30
3.2 Especificaciones .....	31
3.3 Restricciones .....	32
<b>4. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA.....</b>	<b>33</b>
4.1 Parámetros Generales .....	33
4.2 Cobertura Radioeléctrica Capa A.....	36
4.3 Cobertura Radioeléctrica Capa B .....	45
4.4 Red de Telecomunicaciones Fijas .....	52
4.4.1 Tendido de Fibra Óptica .....	52
4.4.2 Red IP Fija.....	52
4.5 Suministro de Energía .....	54
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
<b>6. PRESUPUESTO .....</b>	<b>57</b>
<b>7. IMPACTO DEL PROYECTO.....</b>	<b>60</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>61</b>
8.1 Conclusiones .....	61
8.2 Trabajos Futuros .....	62
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>70</b>

---

A.1	<i>Datasheet</i> de la Antena utilizada en la simulación .....	70
A.2	Tira de vía. Infraestructura. Tramo Toledo – Talayuela.....	72
A.3	Tira de vía. Tendido Fibra Óptica. Tramo Toledo - Talayuela .....	80
A.4	Esquema de Red IP Fija .....	88
A.5	Tira de vía. Suministro de Energía. Tramo Toledo - Talayuela.....	95

# 1. INTRODUCCIÓN

La transformación digital del sistema ferroviario europeo requiere una infraestructura de comunicaciones capaz de soportar los nuevos servicios y exigencias operativas que acompañan al avance hacia una movilidad inteligente. En este escenario, las redes móviles críticas, diseñadas específicamente para entornos ferroviarios, se han convertido en un elemento clave para habilitar tecnologías como la operación automática del tren, el mantenimiento remoto, la videovigilancia en tiempo real o la transmisión de datos operativos de alta velocidad. El actual sistema GSM-R (*Global System for Mobile Communications - Railway*), basado en tecnología 2G, ha cumplido durante años esta función, pero presenta limitaciones importantes de capacidad, interoperabilidad y mantenimiento. De hecho, la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles) ha confirmado que el GSM-R será progresivamente reemplazado a partir de 2030, debido al fin del soporte de fabricantes y su obsolescencia tecnológica [1].

Frente a esta situación, el FRMCS (*Future Railway Mobile Communication System*) se establece como el nuevo estándar europeo para las comunicaciones móviles ferroviarias. Este sistema, en desarrollo por parte del 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) y organismos como ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) y UIC, se basa en la tecnología 5G y proporciona un entorno de red más flexible, fiable y adaptado a las necesidades futuras del sector. FRMCS incorpora capacidades de red definidas por software, baja latencia, comunicaciones ultra fiables y posibilidad de operar en múltiples bandas de frecuencia, permitiendo su implantación tanto en líneas de alta velocidad como en corredores convencionales.

## 1.1 Objetivos y Alcance Del Proyecto

El presente proyecto se enmarca dentro de las iniciativas actuales de modernización y digitalización del sistema ferroviario europeo, que exigen una renovación de las infraestructuras de telecomunicaciones utilizadas en la operación ferroviaria. El sistema actualmente implantado, GSM-R, está basado en tecnología 2G y presenta múltiples limitaciones. Esta situación ha llevado a la UIC a definir un nuevo estándar: el FRMCS basado en tecnología 5G y desarrollado con el objetivo de sustituir progresivamente a GSM-R.

Este Trabajo de Fin de Grado plantea el diseño y simulación de una red FRMCS completa para un tramo en desarrollo de la red ferroviaria española, concretamente entre Toledo y Talayuela, con aplicación futura en la línea Madrid - Extremadura. Se busca garantizar una cobertura fiable y continua a lo largo del trazado, respetando los requisitos técnicos de cobertura definidos por ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) y los estándares EIRENE (*European Integrated Railway Radio Enhanced Network*), y contemplando también la infraestructura de soporte: red fija de comunicaciones, tendido de fibra óptica y suministro eléctrico.

Esta propuesta surge ante la necesidad de disponer de un modelo de red actualizado, robusto y adaptable a las nuevas exigencias del transporte ferroviario. La motivación principal del proyecto es demostrar que es posible diseñar una solución integral y técnicamente viable para un corredor de alta velocidad, utilizando herramientas de simulación profesional y un enfoque estructurado. Se persigue además que el resultado pueda servir de base para una futura implantación real mediante licitación, lo que le otorga al trabajo un alto valor práctico.

Respecto a la estructura de este proyecto, se detalla a continuación por capítulos el siguiente documento:

- En el Capítulo 1 se comienza con una introducción general al contexto del proyecto, donde se justifica la necesidad de modernizar las comunicaciones ferroviarias y se establecen los objetivos, alcance y motivación que dan lugar a este trabajo.
- A continuación, se presenta en el Capítulo 2 estado del arte que recorre la evolución de los sistemas de telecomunicaciones ferroviarias, desde sus orígenes hasta la actualidad, llegando al GSM-R y con especial atención a su progresiva transición hacia el estándar FRMCS, detallándose en este capítulo los elementos técnicos y normativos clave del nuevo sistema.
- El Capítulo 3 se centra en definir las especificaciones técnicas y restricciones que condicionan el diseño, tales como los requisitos de cobertura, entorno físico, frecuencias, y criterios adoptados conforme a los estándares de ADIF y EIRENE.
- El núcleo del proyecto se desarrolla en el Capítulo 4, donde se describe de forma pormenorizada la solución técnica planteada: planificación de emplazamientos en capa A y capa B, simulación de cobertura con HTZ *Communications*, diseño de la red fija (fibra óptica y red de transmisión), así como el sistema de alimentación eléctrica que da soporte a todos los emplazamientos.
- Seguidamente, en el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos en la simulación, con un análisis técnico del cumplimiento de los umbrales establecidos y una valoración del comportamiento de la red en distintos entornos (campo abierto, zonas urbanas y túneles).
- El Capítulo 6 incluye una estimación presupuestaria del proyecto, desglosando tanto los costes de implementación como el equipamiento, licencias y personal técnico implicado.
- Posteriormente, se examina en el Capítulo 7 el impacto del proyecto, abordando sus implicaciones desde los puntos de vista social, medioambiental, ético y económico.
- En el Capítulo 8 se recogen las conclusiones más relevantes del trabajo, así como una propuesta de posibles líneas de desarrollo futuro, destacando la replicabilidad de la solución en otros tramos ferroviarios y la viabilidad de su implantación.
- Finalmente, en el Capítulo 9 se indican las referencias empleadas en la redacción del presente Trabajo Fin de Grado.
- Junto al Trabajo Fin de Grado se incluyen anexos que complementan el proyecto compuesto por los nueve capítulos.

## 1.2 Sistemas de Telecomunicaciones y Red Ferroviaria

El transporte ferroviario en Europa comenzó a desarrollarse tras la crisis del petróleo de 1974, cuando la dependencia energética del continente amenazaba la movilidad interna. Ante este desafío, varios Estados miembros decidieron apostar por un sistema de transporte más eficiente, rápido y ecológico [2].

Desde sus inicios, la explotación ferroviaria ha requerido sistemas de comunicación eficientes para garantizar la seguridad y la operatividad del tráfico ferroviario. A lo largo de la historia, estas soluciones han evolucionado significativamente, desde los primeros sistemas de telegrafía hasta las actuales comunicaciones móviles específicas para el entorno ferroviario. El bloqueo telegráfico fue uno de los primeros sistemas de comunicación utilizados, permitiendo coordinar la circulación de los trenes. Sin embargo, solo posibilitaba el contacto en las estaciones, lo que limitaba considerablemente la comunicación directa durante el trayecto. La invención del teléfono revolucionó esta coordinación, impulsando a las compañías a desarrollar redes telefónicas propias pese a sus altos costes iniciales [3].

El siguiente gran hito en las telecomunicaciones ferroviarias llegó en los años 70 y 80 con la implementación del Tren-Tierra (TT), un sistema de radiotelefonía analógica que permitió la comunicación directa entre los maquinistas y los Puestos de Mando (PM). A diferencia de los sistemas de radiodifusión convencionales, el TT opera en frecuencias reservadas exclusivamente para la explotación ferroviaria, mejorando así la seguridad y la gestión operativa y aunque el TT sigue estando presente en muchas líneas de la red ferroviaria convencional, su capacidad limitada impulsó la necesidad de sistemas más avanzados [2] [3].

A partir de los años 90, con la modernización del ferrocarril y la llegada de la Alta Velocidad Española (AVE), se inició la migración hacia sistemas digitales. En este contexto, se adoptó el estándar *Global System for Mobile Communications – Railway* (GSM-R), basado en tecnología 2G, siendo una adaptación del sistema GSM de telefonía móvil, diseñado específicamente para entornos ferroviarios. El GSM-R se convirtió en el estándar de comunicación en toda la red europea de alta velocidad y en numerosos tramos de la red convencional, proporcionando durante más de 20 años comunicaciones seguras y eficientes para la operación ferroviaria. No obstante, presenta limitaciones técnicas como un ancho de banda reducido y un número de canales limitados, lo que dificulta su adaptación a las nuevas necesidades del sector [3] [4].

Actualmente, las comunicaciones ferroviarias en Europa se basan en el sistema GSM-R, sin embargo, debido a su obsolescencia y limitaciones para soportar las demandas futuras, se tomará el sistema *Future Railway Mobile Communications System* (FRMCS) como su sucesor, iniciándose pruebas en líneas experimentales alrededor de 2025 y comenzar la migración nacional hacia 2028, con operaciones comerciales graduales. En este marco, la modernización de la red ferroviaria en España juega un papel fundamental. España cuenta con una de las mayores redes de alta velocidad del mundo, y la implementación de FRMCS será clave para garantizar su integración con el sistema ferroviario europeo desmantelando dicho sistema de 2G sobre 2035. Esto permitirá no solo mejorar la conectividad nacional, sino también fortalecer su posición dentro del corredor ferroviario transeuropeo [5] [6].

## INTRODUCCIÓN

A su vez, en la década de 1990, surgió la creación de la Red Transeuropea de Transporte (RTE-T), una iniciativa de la Unión Europea destinada a desarrollar una infraestructura de transporte multimodal, eficiente y de alta calidad en todo el continente. Esta red incluye ferrocarriles, carreteras, vías navegables interiores, rutas marítimas de corta distancia, aeropuertos y terminales intermodales, con el objetivo de mejorar la conectividad y cohesión entre las regiones europeas [7].

En la Tabla 1 mostrada a continuación, se recogen algunos de los datos clave del RTE-T, en los que se establecen metas ambiciosas para mejorar y consolidar las infraestructuras de transporte en la Unión Europea, con especial referencia a la red ferroviaria [7]:

Tabla 1. Estrategia RTE-T: Objetivos y Plazos de Implementación

Red ferroviaria	Objetivo Principal	Plazo de implementación	Meta estimada
<i>Core Network</i>	Modernizar y conectar los principales ejes ferroviarios europeos, asegurando interoperabilidad y alta velocidad.	2030	~80.000 km de vía modernizada.
<i>Extended Core Network</i>	Ampliar y reforzar la conectividad en corredores estratégicos adicionales.	2040	Expansión de la red básica con nuevas conexiones clave.
<i>Comprehensive Network</i>	Asegurar la accesibilidad a todas las regiones europeas, incluyendo áreas menos conectadas.	2050	Finalización de la red global con infraestructuras complementarias.

La Red Transeuropea de Transporte ha sido diseñada para garantizar una conectividad eficiente y sostenible entre los países de la Unión Europea. Su estructura se basa en tres niveles de desarrollo [7] [8]:

- *Core Network* (Red Básica): es el núcleo estratégico de la infraestructura ferroviaria europea. Su objetivo es modernizar los corredores principales y garantizar la interoperabilidad entre los diferentes países y operadores ferroviarios. Para ello, se han definido estándares comunes en electrificación, señalización y telecomunicaciones, asegurando que el tráfico de pasajeros y mercancías pueda fluir sin interrupciones. Esta fase debe completarse en 2030 y abarcará aproximadamente 80.000 km de vía.
- *Extended Core Network* (Red Básica Extendida): incorpora corredores adicionales que refuerzan la conectividad entre regiones estratégicas. Aunque mantiene los mismos estándares de interoperabilidad, su implementación se extiende hasta 2040, permitiendo la adaptación progresiva de nuevas infraestructuras sin comprometer la operatividad de la red básica.

- *Comprehensive Network* (Red Global): este nivel complementa la red básica al garantizar la accesibilidad a todas las regiones, incluyendo aquellas con menor densidad de tráfico. Su objetivo es mejorar la cohesión territorial, facilitando la movilidad en áreas más aisladas. Se prevé su finalización para 2050.

Dentro de esta planificación, el ferrocarril ocupa un papel fundamental debido a su capacidad para reducir emisiones y promover el transporte sostenible. La implementación FRMCS será clave para lograr la interoperabilidad total, ya que permitirá una comunicación estandarizada entre las infraestructuras ferroviarias de distintos países.

Para enriquecer la información sobre la RTE-T, es relevante destacar los nueve corredores principales que estructuran esta iniciativa. Estos corredores son fundamentales para garantizar una conectividad eficiente y sostenible en toda Europa. A continuación, se presenta la Tabla 2 que resume estos corredores [7]:

Tabla 2. Corredores principales de la Red RTE-T

Corredor	Ruta Principal	Extensión Aproximada
<b>Báltico-Adriático</b>	Desde Gdynia (Polonia) hasta Ravenna (Italia), pasando por Viena (Austria).	~2.400 km
<b>Mar del Norte-Báltico</b>	De Helsinki (Finlandia) a Amberes (Bélgica), atravesando Varsovia (Polonia) y Berlín (Alemania).	~3.200 km
<b>Mediterráneo</b>	Desde Algeciras (España) hasta Miskolc (Hungría), pasando por Barcelona (España) y Turín (Italia).	~3.000 km
<b>Oriente/Mediterráneo Oriental</b>	De Hamburgo (Alemania) a Nicosia (Chipre), pasando por Budapest (Hungría) y Sofía (Bulgaria).	~3.700 km
<b>Escandinavo-Mediterráneo</b>	Desde Helsinki (Finlandia) hasta La Valeta (Malta), atravesando Copenhague (Dinamarca) y Múnich (Alemania)	~4.858 km
<b>Renano-Alpino</b>	De Róterdam (Países Bajos) a Génova (Italia), pasando por Colonia (Alemania) y Basilea (Suiza).	N/D
<b>Atlántico</b>	Desde Lisboa (Portugal) hasta Estrasburgo (Francia), pasando por Vitoria (España) y París (Francia).	N/D
<b>Mar del Norte-Mediterráneo</b>	De Dublín (Irlanda) a Marsella (Francia), pasando por Ámsterdam (Países Bajos) y Le Havre (Francia).	~933 km
<b>Renano-Danubio</b>	Desde Estrasburgo (Francia) hasta Constanța (Rumanía), pasando por Praga (República Checa) y Budapest (Hungría).	~2.137 km

Dicha red se estructura en torno a estos nueve corredores principales, diseñados para mejorar la conectividad y eficiencia del transporte en Europa. Cada corredor abarca rutas estratégicas que facilitan el movimiento de personas y mercancías a lo largo del continente, los cuales han sido diseñados para optimizar el tráfico intermodal y facilitar la interoperabilidad entre los distintos modos de transporte, promoviendo así una movilidad más eficiente y sostenible [7] [8]. Podemos observar la distribución de la red en la Figura 1 mostrada a continuación:

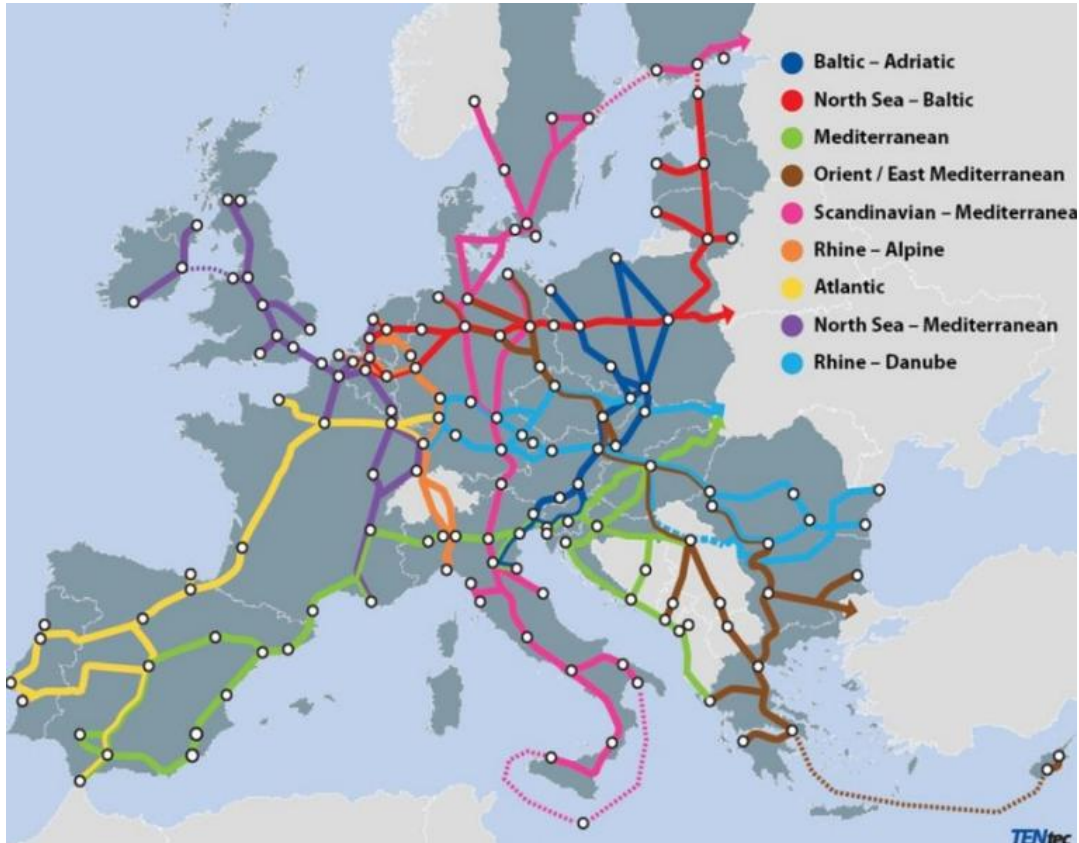


Figura 1. Corredores principales de la Red RTE-T [9]

Además, los países miembros han incrementado sus esfuerzos para consolidar su papel dentro de la red. Con esta evolución, la RTE-T se posiciona como un pilar fundamental para la estrategia de movilidad sostenible de la Unión Europea (UE), impulsando la reducción de emisiones de carbono en el transporte y promoviendo un sistema más eficiente y resiliente a largo plazo [7] [8].

### 1.3. Red Ferroviaria actual en España

La era ferroviaria en España comenzó en 1848 con la inauguración de la primera línea que conectaba Barcelona con Mataró. Este hito, impulsado por el afán de modernización y de fomentar el desarrollo industrial, marca el inicio de una transformación en las comunicaciones del país, estableciendo las bases para una red ferroviaria que, en las décadas siguientes, revolucionaría el transporte y la organización territorial en España con la creación de RENFE (Red Nacional de Ferrocarriles Españoles) dando paso a una única entidad pública que impulsó la modernización del transporte [10].

Actualmente, España dispone de una red ferroviaria de aproximadamente 15.652 kilómetros. Esta red puede ser dividida, por ejemplo, en función del ancho de vía, medido entre las caras internas de los raíles. En la Tabla 3 se comparan los diferentes anchos de vía [11]:

Tabla 3. Anchos de vía en España

Tipo de Red	Tipo de Ancho	Medida (mm)	Kilómetros
Red Convencional (RC)	Ibérico	1.668	11.211
Red de Alta Velocidad	Internacional UIC	1.435	3.030
Red de Ancho Métrico (RAM)	Métrico	1.000	1.193
-	Mixto (combinación de los anteriores)	Variable	245

En la Figura 2 se muestra la distribución y extensión de la red ferroviaria en España, incluyendo las líneas de alta velocidad, convencionales y los anchos métricos, reflejando la infraestructura clave para el transporte ferroviario en el país.



Figura 2. Red ferroviaria en España [12]

Debido al constante desarrollo y modernización del sistema ferroviario, los datos sobre la red pueden experimentar variaciones año tras año. Actualmente, varios países están impulsando la inversión en infraestructuras ferroviarias, promoviendo numerosos proyectos destinados a la mejora y expansión de la red, con el objetivo de incrementar su capacidad, eficiencia y sostenibilidad.

La red de Alta Velocidad en España abarca un total de aproximadamente 3.973,7 kilómetros, aunque su extensión varía dependiendo del tipo de ancho de vía utilizado. Mientras que en la Tabla 3 se presentan exclusivamente los kilómetros correspondientes a la red de ancho estándar UIC, el siguiente desglose incluye también aquellos tramos con anchos de vía ibérico, mixto y convencional adaptados a alta velocidad, proporcionando una visión más detallada de la infraestructura ferroviaria [13]:

- 3.025,8 kilómetros de red de alta velocidad de ancho estándar puro.
- 137,4 kilómetros de red de alta velocidad de ancho ibérico.
- 613,7 kilómetros de red convencional de ancho ibérico puro.
- 196,8 kilómetros de red mixta (ancho estándar y ancho ibérico).

El sistema ferroviario español se organiza en dos ámbitos fundamentales: la gestión de la infraestructura y la operación de los servicios. En este sentido, los organismos encargados de administrar la red son ADIF y ADIF AV (Alta Velocidad), los cuales mantienen y modernizan tanto la red convencional como la de alta velocidad respectivamente, asegurando su integración y el cumplimiento de las normativas de seguridad y eficiencia. Por otro lado, la prestación del servicio está dominada por RENFE Operadora, que actúa como principal operador en el transporte de pasajeros y mercancías, aunque en los últimos años han empezado a emerger nuevos operadores privados que compiten en ciertos segmentos del mercado. Esta estructura dual, en la que conviven actores públicos y privados, ha permitido consolidar una red ferroviaria moderna y competitiva a nivel europeo [14].

España es una de las potencias mundiales en alta velocidad ferroviaria, contando con la red más extensa de Europa y la segunda a nivel global, solo superada por China. La red de alta velocidad gestionada por ADIF AV ha alcanzado los 4.000 kilómetros, consolidando el liderazgo del país en el desarrollo de un modelo de movilidad sostenible y eficiente [12]. Además, España ha destacado por su capacidad para construir infraestructuras ferroviarias a un coste considerablemente inferior al de otros países, con un promedio de 17,7 millones de euros por kilómetro, frente a los 45,5 millones de euros que se registran en otros sistemas de alta velocidad internacionales [15].

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 *Global System for Mobile Communications – Railway (GSM-R)*

Ante la creciente necesidad de mejorar la seguridad y la interoperabilidad del tráfico ferroviario en Europa, la Comisión Europea promovió el desarrollo del *European Rail Traffic Management System* (ERTMS), un estándar unificado para la señalización y gestión ferroviaria. Este sistema permite la creación de una red ferroviaria europea en la que los trenes puedan operar de manera segura en cualquier línea interoperable, sin restricciones por país [16]. El ERTMS se compone de dos elementos clave:

El *European Train Control System (ETCS)*, encargado del control y supervisión automática de los trenes, dividiéndose en tres niveles operativos según el grado de automatización y comunicación con la infraestructura ferroviaria [17] [4]:

- ETCS nivel 1: La información principal proviene de señales o enclavamientos y se transmite al tren mediante balizas normalizadas (*Eurobalise*). La ubicación del tren se determina mediante circuitos de vía convencionales.
- ETCS nivel 2: Se establece una comunicación bidireccional constante entre el tren y el centro de control RBC (*Radio Block Center*) a través del sistema GSM-R, lo que elimina la necesidad de señales laterales. La posición del tren se ajusta con balizas fijas que corrigen posibles desviaciones en el cálculo de su desplazamiento, basado en la distancia recorrida.
- ETCS nivel 3: El propio tren se encarga de verificar su integridad, eliminando la dependencia de circuitos de vía. El bloqueo de la vía se vuelve dinámico, optimizando el uso de la infraestructura mediante el empleo de balizas fijas para indicar la posición del tren.

El *Global System for Mobile Communications – Railway (GSM-R)*, es el sistema que proporciona la infraestructura de comunicaciones móviles para el sector ferroviario. Desempeña un papel fundamental dentro del ERTMS, ya que proporciona la red de telecomunicaciones necesaria para la transmisión de información entre los trenes y los centros de control ferroviario. Su integración en el ERTMS permite la eliminación progresiva de la señalización lateral tradicional, reduciendo costos de mantenimiento y mejorando la operatividad ferroviaria [4].

Desde un enfoque funcional, el sistema se organiza en los siguientes subsistemas [18]:

- Subsistema de estaciones móviles (*Mobile System, MS*). Se compone de los equipos de comunicación instalados en los trenes y dispositivos portátiles utilizados por el personal ferroviario. Su función principal es establecer y mantener la comunicación con la red GSM-R, permitiendo la transmisión de voz y datos esenciales para la operación ferroviaria, como llamadas de emergencia, señalización y control de trenes.
- Subsistema de estaciones base (*Base Station Subsystem, BSS*). Compuesto por:

- BSC (*Base Station Controller*), y TCU (*TransCoder Unit*). Gestionan los recursos radio y controlan las estaciones base desplegadas en los territorios.
- BTSs (*Base Transceiver Station*). Incluye módulos de sistema + cabezas remotas o repetidores, los cuales se despliegan en campo para proporcionar cobertura GSM-R.
- Subsistema de red y conmutación (*Network and Switching Subsystem, NSS*). Se encarga de la gestión y enrutamiento de llamadas y datos dentro del sistema GSM-R, permitiendo la interconexión entre diferentes elementos de la red ferroviaria y garantizando la comunicación eficiente entre trenes y centros de control.
- Subsistema de operación y mantenimiento (*Operation and Management Subsystem, OMSS*). Incluye los equipos encargados del control y supervisión del sistema GSM-R, junto con los dispositivos asociados.

Es un sistema de comunicaciones basado en el estándar ETSI GSM de radio pública, siguiendo las especificaciones operacionales EIRENE (*European Integrated Railway Radio Enhanced Network*) y MORANE (*Mobile Radio for Railways Network in Europe*). A continuación, se comparan en la Tabla 4 las principales características de los sistemas GSM y GSM-R. Estos parámetros pueden ser, entre otros: frecuencias (ascendente, descendente), número de canales (ascendente, descendente), ancho de banda por enlace y tipo de modulación empleada [17] [19]:

Tabla 4. Comparación de los principales parámetros técnicos entre GSM y GSM-R

Parámetro	GSM (Incluye Variantes)	GSM-R
Frecuencias Uplink (UL) (MHz)	890-915 (GSM) 880-890 ( <i>Extended-GSM</i> ) 1710-1785 (GSM-1800)	876-880
Frecuencias Downlink (DL) (MHz)	935-960 (GSM) 925-935 ( <i>Extended-GSM</i> ) 1805-1880 (GSM-1800)	921-925
Canales	Varía según el estándar	UL: 19 y DL: 19
Ancho de Banda (KHz)	200 por canal	UL: 4 y DL: 4
Modulación	GMSK	GMSK

Con respecto a la modulación GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) utilizada en el sistema GSM y GSM-R, la separación entre portadoras empleadas por celdas vecinas tiene que ser como mínimo de 400 kHz, omitiéndose el canal adyacente entre celdas vecinas. Esto aporta una menor interferencia y por ende una mayor robustez.

La banda de frecuencias asignada para el sistema GSM-R cuenta con un ancho de banda de 4 MHz en el rango de 900 MHz. Dicha banda fue recomendada por el ERC (*European Radiocommunications Comitee*) como la banda de frecuencia destinada a las redes móviles

privadas del UIC. Dicha recomendación ha sido incorporada en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [18].

Concretamente, las frecuencias de las portadoras del enlace ascendente van desde 876,2 MHz hasta 879,8 MHz, mientras que el descendente se reparten desde 921,2 MHz hasta 924,8 MHz. Esta organización de frecuencias proporciona un sistema FDD (*Frequency-Division Duplex*), dúplex por división en frecuencia, con 45 kHz de separación entre las dos sub-bandas, siendo el espaciado entre las portadoras de 200 kHz. Considerando la banda de guarda de 200 kHz se obtiene un total de 19 canales [18].

En la Figura 3 el espaciado entre las portadoras está representado por diferentes colores. Cada color corresponde a una separación de portadoras de 200 kHz. El ancho de banda total de cada enlace, representado por cada conjunto de bloques, es de 4 MHz, lo que implica que cada bloque de colores indica un rango de frecuencias con esta amplitud [20].

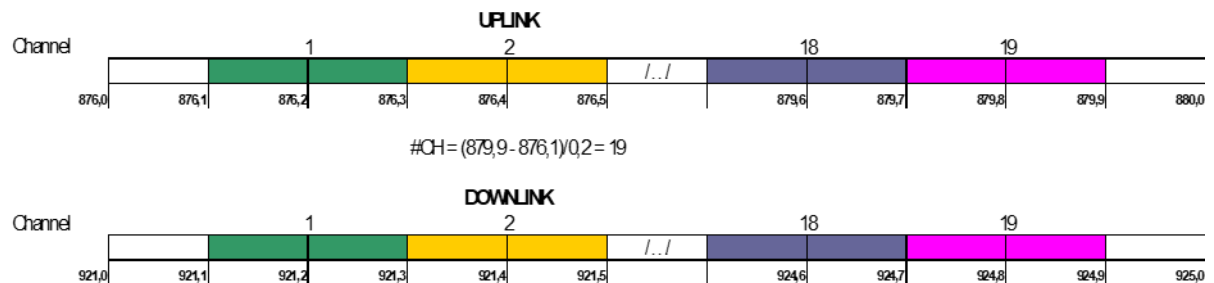


Figura 3. Frecuencias de las portadoras en la banda de GSM-R en MHz

Una de las estrategias clave para garantizar este sistema minimizando el impacto de fallos ha sido la configuración de doble capa de las redes de comunicaciones móviles GSM-R, con dos sistemas independientes, denominados capa A y capa B. Esta redundancia es fundamental para asegurar la seguridad, disponibilidad y fiabilidad de las comunicaciones, ya que, en caso de que uno de los elementos de una capa falle y no disponga de un transmisor de reserva, la otra capa entra en funcionamiento automáticamente, manteniendo la operatividad con las mismas prestaciones.

En España se prevé mantener este diseño de doble capa en la transición al FRMCS. La continuidad de este enfoque responde a la necesidad de garantizar la máxima disponibilidad del servicio y reducir la probabilidad de interrupciones en las comunicaciones críticas del sistema ferroviario.

Además, la arquitectura de doble capa en GSM-R no solo se basa en la redundancia, sino también en la disposición estratégica de los emplazamientos de las estaciones base. Se alternan las ubicaciones de la capa A y la capa B a lo largo de la vía para cubrir de manera uniforme toda la infraestructura. A esto se suma la técnica de reutilización de frecuencias, en la que las frecuencias de operación se repiten cada cierto tramo, asegurando que las señales iguales estén lo más alejadas posible, minimizando así el riesgo de interferencias.

A pesar de estos mecanismos de robustez, cada capa del sistema debe operar de manera aislada y cumplir con los estrictos requisitos de cobertura y calidad definidos por el estándar europeo EIRENE, desarrollado por la UIC. Este marco normativo dicta los niveles de cobertura radioeléctrica necesarios para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema de comunicaciones ferroviarias en Europa. Los más destacados por este organismo se aprecian en la Tabla 5 [18]:

Tabla 5. Requisitos de cobertura determinados por EIRENE

Escenario	Cobertura mínima	Sensibilidad recomendada	Velocidad del tren
Red ferroviaria estándar	≥ 95 %	-98 dBm	≤ 220 km/h
Alta velocidad	≥ 95 %	-95 dBm	220 - 280 km/h
Velocidades extremas	≥ 95 %	-92 dBm	≥ 280 km/h

Estos requisitos mínimos garantizan una conectividad fiable en las líneas ferroviarias. Sin embargo, algunos países han optado por imponer criterios más estrictos, ajustando la sensibilidad de señal y los umbrales de cobertura a sus necesidades operativas específicas, como el caso de España. La planificación radioeléctrica de la red ferroviaria es gestionada por ADIF, exigiendo [18]:

- Cobertura en campo abierto: Señal mínima de -85 dBm.
- Cobertura en túneles y entornos cerrados: Señal mínima de -70 dBm.

Estos valores reflejan la necesidad de asegurar comunicaciones fiables incluso en escenarios con condiciones desfavorables para la propagación de la señal.

### 2.1.1 Limitaciones del GSM-R

El sistema GSM-R, basado en la tecnología GSM de segunda generación, enfrenta actualmente importantes limitaciones en un entorno donde las telecomunicaciones han evolucionado hacia redes más avanzadas como 4G y 5G. Aunque en su momento representó un avance significativo para la comunicación ferroviaria, hoy en día su capacidad y eficiencia resultan insuficientes, especialmente en áreas de alta densidad de tráfico y en aplicaciones que requieren transmisión de datos intensiva. Su obsolescencia tecnológica pone en riesgo la fiabilidad y el rendimiento del sistema ferroviario, haciendo necesario su reemplazo o evolución.

Uno de los desafíos más relevantes radica en la interoperabilidad del GSM-R entre diferentes países y proveedores. Las diferencias en los principios de señalización y en el software de enclavamiento generan barreras para la integración de nuevas tecnologías y complican la estandarización a nivel europeo. La falta de homogeneidad en la implementación del sistema también incrementa los costos y la complejidad de mantenimiento, lo que refuerza la necesidad de una transición hacia soluciones más modernas y flexibles [21].

Además, la creciente importancia de la ciberseguridad en infraestructuras críticas resalta otra limitación del GSM-R. Su diseño, basado en estándares antiguos, no contempla las amenazas cibernéticas actuales, lo que lo hace más vulnerable a posibles ataques. La migración hacia redes 5G no solo proporcionará mejoras en capacidad y velocidad, sino que también permitirá la adopción de protocolos de seguridad más robustos, garantizando la protección de los sistemas ferroviarios frente a amenazas digitales [22].

La transición del sistema GSM-R a tecnologías más avanzadas, como el FRMCS, representa un desafío estratégico que requiere una planificación detallada y la colaboración entre distintos actores del sector ferroviario. Este proceso es fundamental para asegurar un sistema de comunicaciones ferroviarias más eficiente, seguro y adaptado a las necesidades futuras del transporte ferroviario. La evolución hacia un entorno ferroviario digitalizado permitirá optimizar la operatividad, mejorar la gestión del tráfico y garantizar la continuidad del servicio en un contexto de creciente demanda y modernización del sector.

## 2.2 Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)

### 2.2.1 Descripción y Beneficios

El **FRMCS** es el sistema de comunicación móvil de próxima generación diseñado para el sector ferroviario, desarrollado bajo la colaboración internacional entre diversos organismos que trabajan conjuntamente para su estandarización e implementación en el sector ferroviario. La UIC lidera la iniciativa, coordinando a los actores clave del sector en la definición de los requisitos y especificaciones del sistema. El FRMCS está destinado a reemplazar al actual sistema GSM-R y a servir como pilar fundamental en la digitalización del transporte ferroviario asegurando la continuidad y mejora de las comunicaciones operativas en el sector ferroviario. La Figura 4 muestra de manera esquemática cómo se articula este sistema, representando los diferentes tipos de usuarios y servicios que integran el ecosistema FRMCS, así como los canales de comunicación entre ellos.

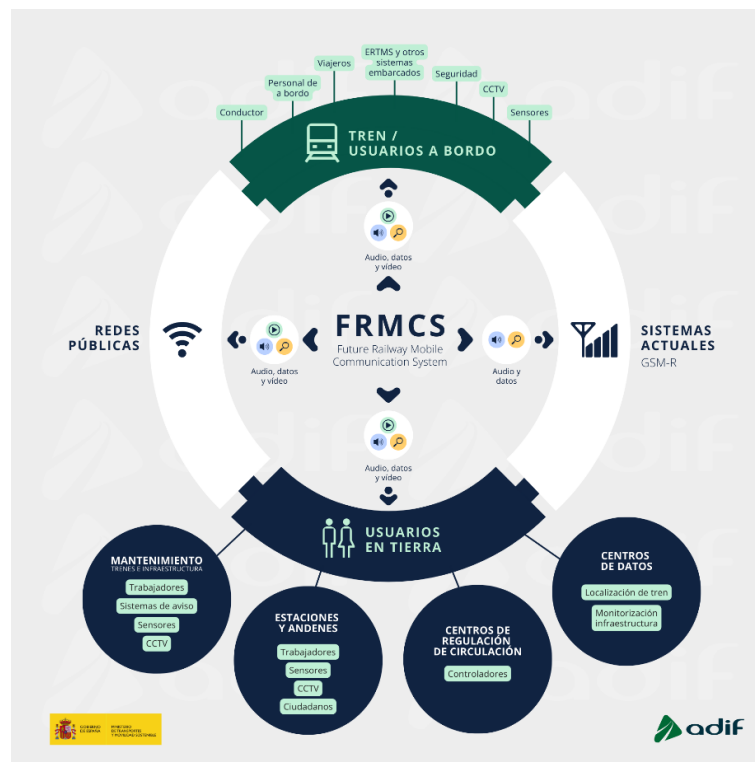


Figura 4. Esquema FRMCS [23]

A continuación, se presentan en detalle los principales objetivos y beneficios de FRMCS, destacando cómo esta nueva tecnología de comunicaciones ferroviarias no solo reemplazará al GSM-R, sino que también introducirá mejoras significativas en términos de capacidad, fiabilidad, seguridad y flexibilidad. Estos avances permitirán optimizar la operación ferroviaria, facilitar la transición hacia trenes más autónomos y digitales, y garantizar una conectividad estable y de alto rendimiento en todo tipo de entornos ferroviarios [24] [25]:

- **Alta capacidad y rendimiento:** Basado en tecnología 5G, el FRMCS ofrece una mayor capacidad de transmisión de datos, aumentando su velocidad de 9,6 kbps por canal en GSM-R hasta 100 Mbps, permitiendo la implementación de aplicaciones avanzadas, así

como un aumento de la seguridad y eficiencia, pudiendo alcanzar en los trenes velocidades mayores de 500km/h frente a los 300-350 km/h que se obtenían con GSM-R.

- Baja latencia: La reducción en los tiempos de respuesta es esencial para aplicaciones que requieren acciones inmediatas, como sistemas de prevención de colisiones y operaciones de trenes autónomos.
- Confiabilidad y disponibilidad mejoradas: El sistema está diseñado para proporcionar una disponibilidad de red de hasta el 99,9999%, asegurando comunicaciones estables y seguras en operaciones críticas.
- Soporte para IoT (*Internet of Things*): FRMCS facilita la integración de dispositivos IoT, permitiendo el monitoreo y mantenimiento predictivo de la infraestructura ferroviaria y el material rodante.
- Flexibilidad en el uso del espectro: El sistema es compatible con múltiples bandas de espectro, lo que permite una implementación más adaptable según las necesidades específicas de cada región u operador.
- Interoperabilidad global y seguridad cibernética robusta: Uno de los pilares del FRMCS es garantizar la interoperabilidad a nivel mundial, permitiendo que los sistemas ferroviarios de diferentes países y regiones puedan comunicarse y operar de manera conjunta sin problemas, lo que es esencial para el transporte transfronterizo eficiente. Incorporará medidas avanzadas de seguridad para proteger las comunicaciones contra amenazas cibernéticas, asegurando la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos.

El desarrollo de este sistema es, como ya se ha comentado, un proceso colaborativo. En paralelo a la función de la UIC, existen dentro de ella diferentes grupos de trabajo que supervisan aspectos específicos del sistema. En la Figura 5 se pueden observar los diferentes organismos o grupos que estuvieron trabajando para desarrollar este nuevo sistema.

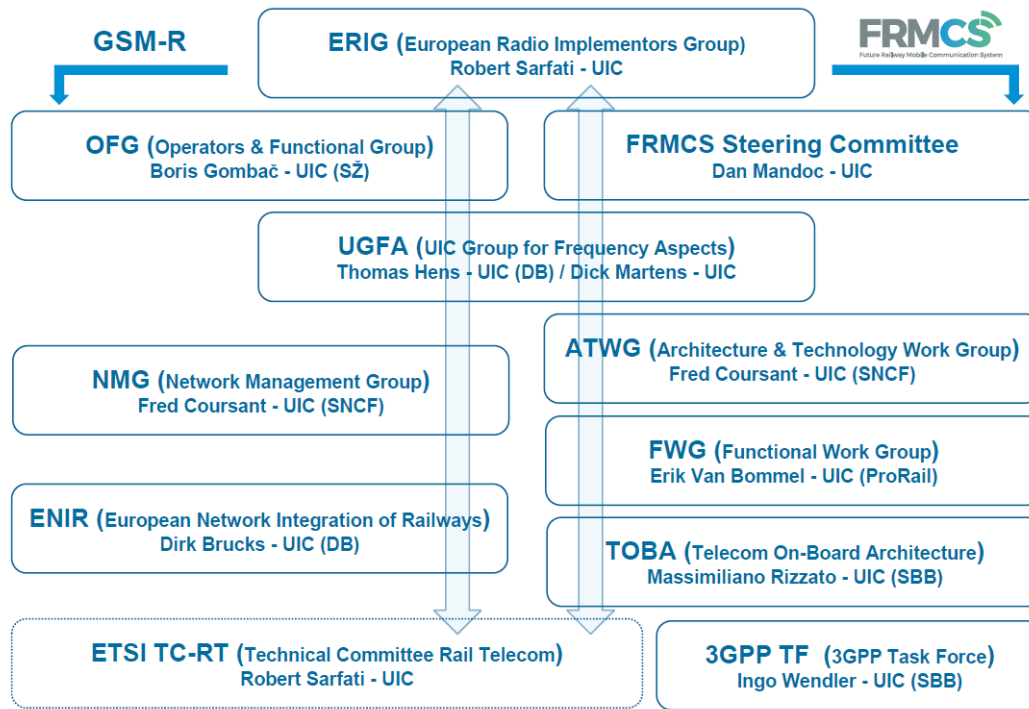


Figura 5. Organización de GSM-R y FRMCS [26]

A continuación, se procede a detallar la función de estos grupos implicados [26]:

- **FRMCS Steering Committee:** es el órgano de dirección que supervisa el desarrollo del FRMCS y su implementación a nivel global.
- **UIC Groups for Frequency Aspects (UGFA):** así como el *European Radio Implementors Group* (ERIG) se encargan de gestionar los aspectos relacionados con el uso del espectro radioeléctrico y la asignación de frecuencias dentro del sistema ferroviario, asegurando su compatibilidad con otras tecnologías de comunicación.
- **Architecture & Technology Work Group (ATWG) y Functional Work Group (FWG):** Grupo que corresponde a la infraestructura técnica. Trabajan en el diseño y desarrollo de la arquitectura del FRMCS, garantizando que sus especificaciones sean adecuadas para la operación ferroviaria y que se integren con sus sistemas preexistentes. Dentro de este marco, el **Telecom On-Board Architecture (TOBA)** se especializa en la arquitectura de telecomunicaciones a bordo, facilitando la conectividad entre trenes.
- **3GPP:** integra los requisitos ferroviarios dentro de los estándares globales de telecomunicaciones móviles, asegurando la compatibilidad del FRMCS con tecnologías avanzadas como 5G [27] [28]. Este trabajo se lleva a cabo en conjunto con el **3GPP Task Force (3GPP TF)** dentro de la UIC.
- **Technical Committee Rail Telecom (ETSI TC-RT):** el ETSI, a través de este comité, se encarga de la normalización técnica del sistema, defendiendo los estándares que regirán su implementación. Mientras que la ERA (*European Union Agency for Railways*) supervisa su incorporación en las TSI (*Technical Specifications of Interoperability*), garantizando que el sistema cumpla con los criterios de seguridad e interoperabilidad a nivel europeo.

- **Union des Industries Ferroviaires Européennes (UNIFE):** representa a los proveedores del sector, aportando su experiencia y perspectiva en la fabricación e implementación del FRMCS [29].

La transición del GSM-R al FRMCS sigue una estructura planificada en distintas fases, asegurando un cambio progresivo, seguro y eficiente. Cada una de estas etapas cumple un propósito específico, abordando desafíos técnicos, regulatorios y operacionales de manera ordenada. A continuación, se adjunta la Tabla 6 que sintetiza de forma estructurada las distintas fases del proceso. Posteriormente, se resume con brevedad para una mejor comprensión [6, 26-30, 55].

Tabla 6. Migración GSM-R a FRMCS

Periodo	Fase	Organismos Involucrados	Principales Actividades	3GPP Release
2018-2019	Definición de Requisitos y Planificación	UIC, ERA, 3GPP, ETSI, UNIFE	- Definición de URS. -Identificación de requisitos técnicos. - Primeros estudios sobre migración desde GSM-R.	Inicio de la integración de FRMCS en 3GPP.
2019-2021	Estandarización y Especificación (FRMCS V1)	UIC, ERA, 3GPP, ETSI, CEPT	-Desarrollo de FRS & SRS 1.0. -Validación de casos de uso en 3GPP Release 16 y 17. -Incorporación del FRMCS en la TSI CCS. -Definición de arquitectura TOBA V1.	Rel. 16: FRMCS se incorpora en estándares 4G/5G.
2021-2023	Desarrollo de Prototipos y Pruebas (FRMCS V2)	UIC, 3GPP, ETSI, H2020 5GRail	- Pruebas de demostración bajo H2020 5GRail. -Desarrollo de FRS & SRS 2.0. -Validación con 3GPP Release 17 y 18. -Evaluación de migración y coexistencia con GSM-R.	Rel. 17: MCX sobre 5G, MCVideo ferroviario.
2023-2025	Ensayos Europeos y Preparación del Mercado (FRMCS V3)	UIC, ERA, 3GPP, ETSI, CEF2, S2R	- FRMCS V3. -Pruebas en corredores ferroviarios europeos. -Integración con CEF2 y S2R. -Desarrollo de hubs ENIR. -Evaluación de interoperabilidad transfronteriza.	Rel. 18: -Interoperabilidad FRMCS-GSM-R. -Mejoras en MCX. -Implementación de Multicast MBS.
2025-2028	Pruebas Piloto y Operaciones Comerciales	UIC, 3GPP, ETSI	-Pruebas operacionales con FRMCS V3. -Implementación de casos de uso avanzados: ATO GoA3/4, TCMS, IoT ferroviario. -Integración con 5G SA.	Rel. 19: Expansión del FRMCS con IoT, acoplamiento virtual y automatización ferroviaria.
2028+	Despliegue General y Migración Completa	UIC, 3GPP, ETSI, Operadores ferroviarios, Gobiernos	- Despliegue completo del FRMCS en Europa. -Eliminación progresiva de GSM-R. -Expansión con tecnologías satelitales y WiFi avanzado.	Rel. 20+: Evolución hacia inteligencia artificial, redes híbridas satelitales y expansión global del FRMCS.

La evolución del FRMCS se ha estructurado en distintas fases desde 2018 hasta su despliegue completo previsto para después de 2028. En la primera etapa (2018-2023), los principales organismos internacionales como la UIC, 3GPP y ETSI trabajaron en la definición de requisitos, estandarización del sistema y validación de prototipos, sentando las bases técnicas del nuevo sistema de comunicación ferroviaria. Durante este periodo se introdujo FRMCS en las *Release* 16 y 17 del 3GPP, asegurando su integración en el ecosistema 5G y desarrollando las primeras especificaciones funcionales FRS (*Functional Requirements Specification*) y SRS (*System Requirements Specification*).

A continuación, entre 2023 y 2025, el foco se ha desplazado hacia la validación operativa del sistema en entornos reales, especialmente en corredores ferroviarios europeos. En esta fase destaca la iniciativa MORANE-2 [30], impulsada por la UIC, que coordina pruebas de interoperabilidad transfronteriza y ensayos extremo a extremo del FRMCS para asegurar su preparación comercial. Paralelamente, se han introducido mejoras tecnológicas dentro de la *Release* 18.

Entre 2025 y 2028, se iniciará el uso comercial del FRMCS en líneas ferroviarias reales, integrando funcionalidades avanzadas como el IoT ferroviario, la automatización del tráfico ATO (*Automatic Train Operation*) y el uso de 5G SA (*Standalone*). Finalmente, a partir de 2028, se prevé su implantación completa en Europa, sustituyendo al GSM-R y ampliando su funcionalidad mediante tecnologías como IA (Inteligencia Artificial), redes híbridas y satelitales, tal y como se contempla en la *Release* 20+.

Con su despliegue completo, el FRMCS se convertirá en la columna vertebral de las comunicaciones ferroviarias en Europa y otras regiones del mundo, proporcionando un sistema más seguro, fiable y preparado para la automatización total del transporte ferroviario. No obstante, las fechas de las fases son puramente teóricas, ya que podrán verse modificadas en función de hitos, disponibilidad, etc.

## 2.2.2 Arquitectura

La arquitectura del FRMCS está diseñada para proporcionar una infraestructura de comunicaciones fiable, segura y de alta capacidad para el sector ferroviario. En la Figura 6, se ilustra la estructura del sistema FRMCS basada en tecnología 5G-R (5G-Rail), organizada en diferentes capas que interactúan entre sí para garantizar la interoperabilidad y la eficiencia operativa en entornos ferroviarios de alta velocidad [24].

La Figura 6 representa una visión esquemática de la infraestructura de red utilizada en FRMCS, donde se pueden identificar cuatro capas principales [31]:

- **Capa de Aplicación (*Application Layer*):** Responsable de los servicios ferroviarios.
- **Capa Central (*Core Layer*):** Conformada por la red Core 5G-R, que gestiona el tráfico de datos, la movilidad y la redundancia de red para garantizar la continuidad del servicio.
- **Capa de Acceso Radio (*Radio Access Layer*):** Formada por estaciones base 5G-R gNB (*Next Generation Node B*) y unidades remotas de radio RRU, que establecen la comunicación inalámbrica entre la infraestructura ferroviaria y los trenes.
- **Capa Terminal (*Terminal Layer*):** Incluye los sistemas a bordo de los trenes, que dependen de la conectividad FRMCS para su correcto funcionamiento.

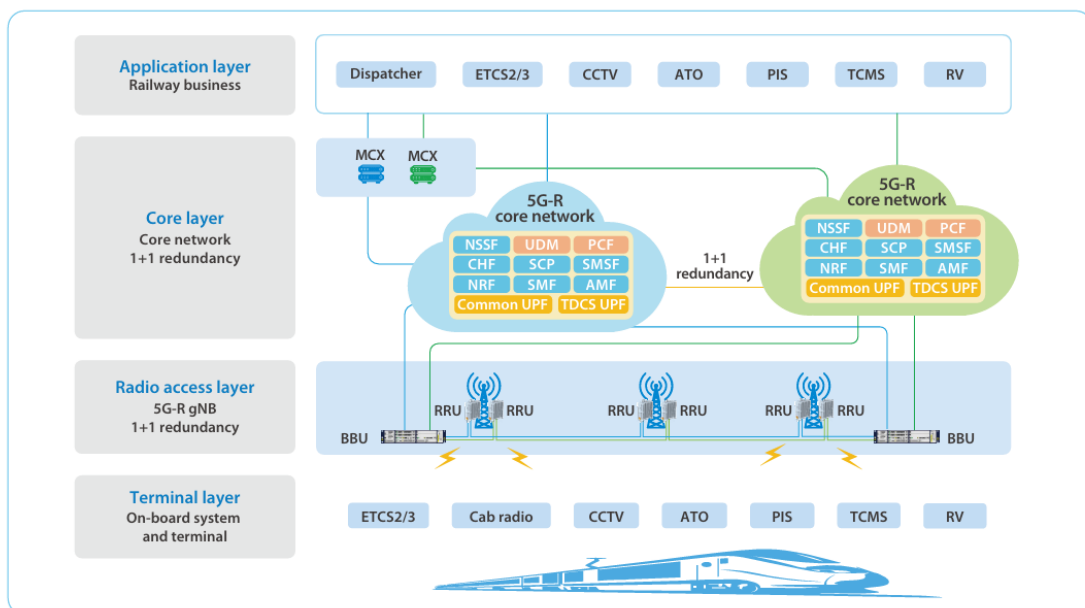


Figura 6. Arquitectura FRMCS [31]

A continuación, se dividirá cada capa de la arquitectura de FRMCS en subapartados, para proceder a detallar de manera extensa sus funciones, los elementos que la componen y su importancia en la infraestructura ferroviaria.

2.2.2.1. Capa de Aplicación

En la parte superior de la Figura 6 se encuentra la capa de aplicación, que representa los servicios ferroviarios críticos que dependen de la comunicación a través de la red 5G-R. Los servicios clave incluidos en esta capa son:

- **ETCS 2/3:** Establece una comunicación segura para la señalización y el control ferroviario como ya fue explicado en el apartado de GSM-R. Con la migración al FRMCS se busca cómo integrar las nuevas funcionalidades de éste en las unidades a bordo existentes, garantizando una transición eficiente y segura [32]. La UIC describe cuatro posibles variantes para alcanzar esta migración progresiva al FRMCS como se muestra en la Figura 7.

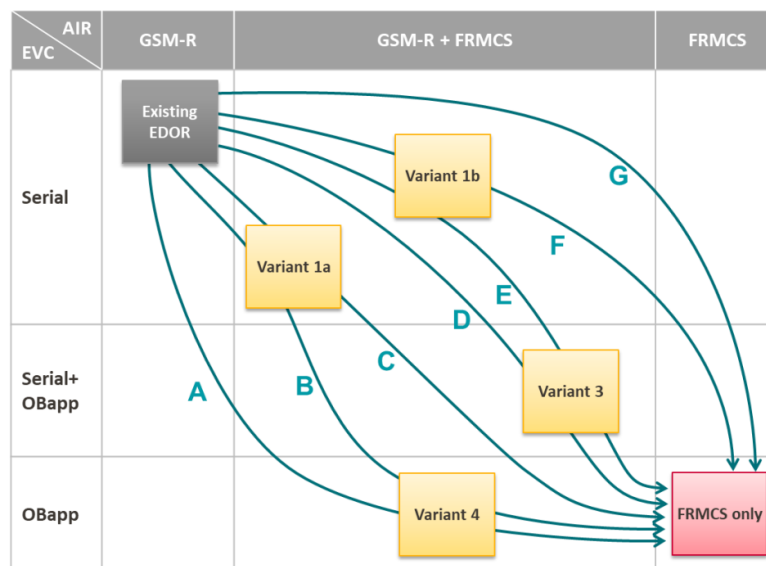


Figura 7. Posible migración de los servicios ETCS de GSM-R a FRMCS [32]

Estas variantes difieren en el grado de modificación necesario tanto en las unidades embarcadas como en la infraestructura, permitiendo a los operadores ferroviarios adaptar la transición según sus necesidades técnicas y operativas. Esta flexibilidad facilita una migración escalonada, reduciendo riesgos y costes durante el proceso de implementación. Gracias a la futura implementación del FRMCS, el nivel 3 de ETCS será el más eficiente, debido al aprovechamiento máximo de las capacidades del 5G, como la baja latencia, mayor ancho de banda y comunicaciones en tiempo real, por lo que marcará el camino hacia la digitalización ferroviaria total [33].

- **CCTV (Closed Circuit Television):** Mejorará la seguridad y eficiencia operativa de este sistema de seguridad la digitalización avanzada gracias al 5G, permitiendo una monitorización continua y una respuesta inmediata ante incidentes [34].

- **PIS (*Passenger Information System*):** Este sistema proporciona datos en tiempo real sobre horarios de llegada y salida, retrasos, destinos y tarifas, mejorando la experiencia de viaje y reduciendo la incertidumbre para los usuarios. La recopilación y procesamiento continuo de datos de vehículos y obstrucciones en tiempo real se verá mejorado significativamente al proporcionarse una mayor velocidad de transmisión y latencia reducida gracias al 5G [35].
- **TCMS (*Train Control and Monitoring System*):** Es un sistema esencial en los trenes modernos que supervisa y controla diversos subsistemas a bordo, como la tracción, el frenado y la climatización. La evolución hacia una nueva generación de TCMS busca superar las limitaciones actuales, permitiendo una mayor flexibilidad y eficiencia operativa. Innovaciones como el concepto *drive-by-data* y la transmisión inalámbrica de información están en desarrollo para mejorar las funciones de control y facilitar la integración de tecnologías avanzadas en los trenes del futuro, ya que la tecnología actual de este sistema se basa en conceptos de la década de 1990 [36] [37].
- **ATO:** Este sistema es clave en las líneas ferroviarias. Cuenta entre sus principales beneficios con la posibilidad de aumentar la frecuencia de los trenes, lo que se traduce en un mejor servicio para los pasajeros. Además, contribuye a la reducción del consumo energético, disminuye los costos operativos y mejora la puntualidad de los servicios [38]. Los Grados de Automatización (GoA) en la operación ferroviaria van desde el GoA 0, donde el conductor controla manualmente todas las funciones del tren, hasta el GoA 4, que permite una operación totalmente automática sin personal a bordo, incluyendo la gestión de puertas y emergencias [39].
- **Dispatcher:** Facilita la coordinación y gestión en tiempo real de las operaciones ferroviarias entre el operador y el maquinista, a través de la interfaz de usuario del centro de control, gracias a un sistema de comunicaciones integrado [40]. Desempeña un papel crucial en la gestión y coordinación de las comunicaciones en entornos críticos. Al integrarse con los servicios MCX (*Mission Critical Services*), el despachador puede gestionar de manera eficiente comunicaciones de voz, datos y video en tiempo real, garantizando una respuesta rápida y efectiva en situaciones de emergencia [41].

Todos estos servicios de la Figura 8 se comunican con la red Core 5G mediante funciones MCX. Son fundamentales en la arquitectura de FRMCS, ya que garantizan comunicaciones fiables y seguras para aplicaciones esenciales en el mundo ferroviario.

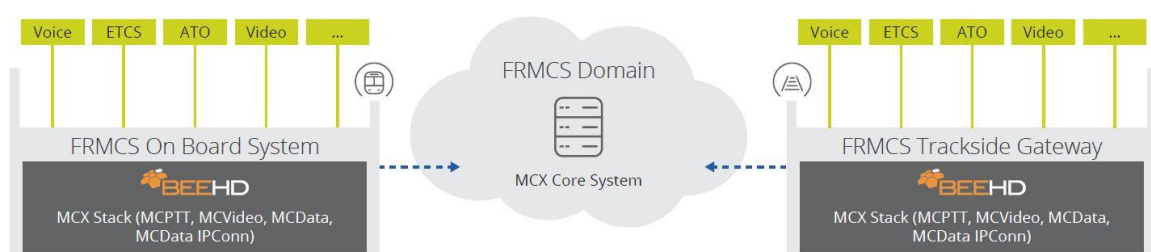


Figura 8. Arquitectura del Sistema MCX [42]

Estos servicios están estandarizados por 3GPP e incluyen MCPTT (*Push-to-talk*) MCVideo y MCDData.

- **MCPTT:** es un servicio de comunicación de voz diseñado para entornos de misión crítica, operando sobre redes LTE (*Long-Term Evolution*) [43] y 5G. Su principal característica es la capacidad de establecer llamadas instantáneas con solo presionar un botón, similar a los sistemas de radio tradicionales, pero con la ventaja de aprovechar la infraestructura de banda ancha. Este servicio permite llamadas individuales, de grupo y de emergencia, asegurando que los mensajes de voz sean transmitidos de manera prioritaria y sin interrupciones, incluso en escenarios de alta congestión. Además, ofrece una comunicación segura mediante encriptación avanzada, garantizando la protección de la información en entornos ferroviarios y de seguridad pública [44].
- **MCVideo:** es una solución que proporciona transmisión de video en tiempo real, permitiendo mejorar la supervisión y coordinación en entornos ferroviarios. Gracias a la integración con redes de alta velocidad como 5G, este servicio posibilita la transmisión de imágenes en directo con mínima latencia, facilitando la toma de decisiones en operaciones críticas. Permite realizar llamadas de video privadas, grupales o de difusión masiva, además de ser una herramienta clave para la vigilancia a bordo de trenes, estaciones y áreas ferroviarias [45].
- **MCDData:** es un servicio que permite la transmisión eficiente y segura de datos esenciales para la operación ferroviaria y otros sectores de misión crítica. A través de este sistema, se pueden enviar mensajes cortos, notificaciones encriptadas y datos estructurados, asegurando una comunicación confiable en todo momento. La integración de MCDData con sistemas de control y señalización, como FRMCS y ETCS, facilita la automatización de procesos y la actualización remota de información operativa [46].

### 2.2.2.2. Capa Central

*Core Layer* es la columna vertebral del FRMCS. Es una arquitectura de red diseñada para gestionar eficientemente las comunicaciones en la tecnología 5G. A diferencia de las generaciones anteriores, la 5GC (5G Core), al estar “construido sobre 5G”, el núcleo FRMCS adopta las mismas tecnologías de base que las redes 5G públicas, con adaptaciones al entorno ferroviario. Esta capa representa una evolución respecto a la red GSM-R, permitiendo una conectividad IP (*Internet Protocol*) nativa, altamente disponible y segura. Su diseño responde a las necesidades críticas del entorno ferroviario de alta velocidad, incluyendo baja latencia, alta capacidad de datos y fiabilidad extrema [47] [48].

Una de las novedades más importantes que incorpora el núcleo de red 5GC es el uso de una Arquitectura Basada en Servicios, conocida por sus siglas en inglés como SBA (*Service-Based Architecture*). Este tipo de arquitectura se basa en la idea de construir la red a partir de servicios individuales que se comunican entre sí, como se aprecia en la Figura 9 en lugar de depender de conexiones fijas o bloques rígidos como ocurría en generaciones anteriores, especialmente en 4G [47].

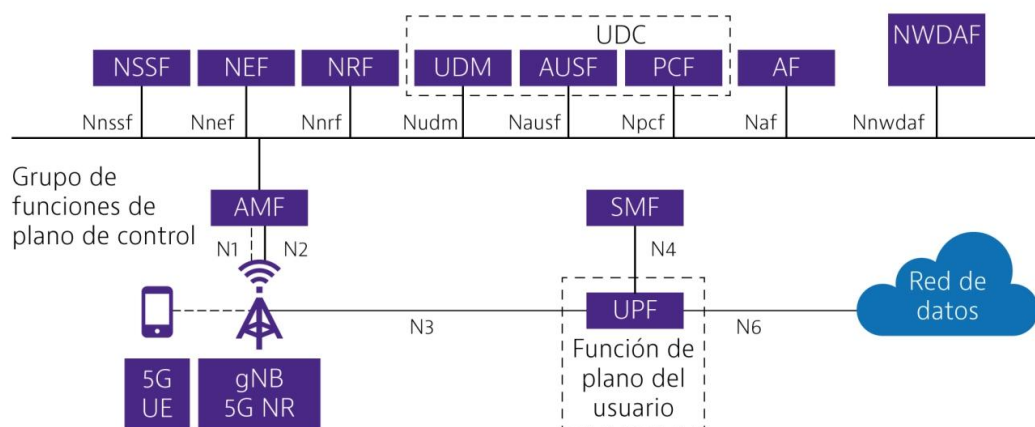


Figura 9. Arquitectura Red 5GC [49]

En la práctica, esto significa que cada parte del núcleo, denominada función de red (*Network Function*, NF), puede ofrecer un conjunto de servicios específicos y también puede utilizar servicios de otras funciones según lo necesite. Por ejemplo, una función puede encargarse del control de la movilidad del tren, otra de asignar direcciones IP a los dispositivos, y otra de aplicar políticas de calidad de servicio. La compatibilidad completa con las interfaces definidas por el proyecto 3GPP, como N1, N2, N3 y N6, permite al comprobador simular con precisión tanto las aplicaciones de los equipos de usuario como el comportamiento de movilidad en entornos que involucren redes 5G y diferentes tecnologías de acceso radioeléctrico (*Radio Access Technology* RAT), pudiendo hablar entre sí a través de interfaces estándar, lo que facilita enormemente su colaboración [49].

A continuación, se presentan las funciones principales del plano de control y usuario del núcleo de red 5G adoptadas por el FRMCS. Cada una de ellas cumple un rol concreto y colabora con las demás a través de interfaces estandarizadas como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Principales Funciones en la Arquitectura de Red 5G [47]

Función	Abreviatura	Función Principal
<i>Access and Mobility Function</i>	AMF	Registro y movilidad de equipos de usuario
<i>Session Management Function</i>	SMF	Gestión de sesiones y asignación de direcciones IP
<i>User Plane Function</i>	UPF	Encaminamiento del tráfico de datos del usuario
<i>Policy Control Function</i>	PCF	Aplicación de políticas de red y QoS
<i>Network Repository Function</i>	NRF	Catálogo y descubrimiento de funciones disponibles
<i>Network Exposure Function</i>	NEF	Interfaz entre red y aplicaciones externas
<i>Authentication Server Function</i>	AUSF	Autenticación de equipos de usuario
<i>Unified Data Management</i>	UDM	Gestión de datos de suscripción y perfiles de usuario
<i>Network Slice Selection Function</i>	NSSF	Asignación del 'slice' de red más adecuado
<i>Application Function</i>	AF	Proporciona información y requisitos de aplicaciones externas al núcleo 5G
<i>Network Data Analytics Function</i>	NWDAF	Análisis de datos de red y soporte a decisiones mediante inteligencia artificial

Todo este despliegue completo de red 5G que ha sido explicado y detallado, tanto de radio como el núcleo, es el que se conoce como el modo **Standalone**. Es decir, todo el sistema funciona sobre una arquitectura 5G pura [50].

Mientras que el **Non-Standalone (NSA)** se basa en utilizar la infraestructura existente de 4G LTE, especialmente su núcleo EPC (*Evolved Packet Core*), mientras se despliega una nueva red de acceso radioeléctrica (5G *New Radio*) 5G NR. En este caso, el núcleo sigue siendo 4G, y solo la interfaz radio (la parte que conecta al usuario con la red) se actualiza a 5G. Este tipo de despliegue fue pensado como una fase transitoria, ya que permite ofrecer mayores velocidades y menor latencia sin necesidad de renovar toda la infraestructura de red. Sin embargo, no permite aprovechar todas las funcionalidades del 5G, como el *network slicing*, la arquitectura basada en servicios o la baja latencia extrema, aspectos fundamentales para FRMCS [50].

En sistemas ferroviarios de misión crítica como FRMCS, la disponibilidad continua del servicio es un requisito innegociable. Por ello, la arquitectura de red se diseña siguiendo esquemas de redundancia 1+1, un modelo que implica la duplicación completa de los elementos clave del sistema. El objetivo es garantizar que, ante cualquier fallo en el nodo principal, el sistema de

respaldo asuma el funcionamiento de forma automática y sin pérdida de servicio. A continuación, se describen los niveles más relevantes en el contexto del núcleo 5GC [31]:

- **Redundancia a nivel de red (*Dual Data Center*):** se duplica toda la infraestructura de red en dos centros de datos separados, permitiendo una conmutación automática entre ellos.
- **Redundancia a nivel de función de red (*NF-Level*):** se aplican esquemas activo-activo o activo-reserva en las funciones virtualizadas del núcleo (AMF, SMF, UPF, etc.).
- **Redundancia de enlaces (*Link-Level*):** se instalan rutas físicas alternativas para mantener la conectividad si un enlace falla.
- **Redundancia de nodos (*Node-Level*):** los elementos físicos, como unidades de radio o controladoras, tienen un nodo gemelo que puede asumir su tarea si ocurre un fallo.
- **Redundancia a nivel de placa (*Board-Level*):** cada tarjeta o módulo crítico dentro del hardware cuenta con un respaldo idéntico.
- **Redundancia de componentes (*Component-Level*):** los elementos más básicos (chips, fuentes, conectores) se seleccionan y duplican para soportar condiciones extremas y minimizar el riesgo de fallo.

Esta clasificación permite abordar la disponibilidad desde un enfoque multicapa, asegurando que la red pueda responder de forma rápida y eficaz a cualquier incidente, desde un fallo menor hasta una caída total de un nodo o centro de control.

### 2.2.2.3. Capa de Acceso Radio

La Red Radio de FRMCS constituye el sistema de acceso responsable de conectar la infraestructura de tierra con el tren. En las Redes de Acceso Radio (*Radio Access Network RAN*) modernas, incluidas las de FRMCS, se utiliza una arquitectura distribuida que separa las funciones de radiofrecuencia y procesamiento digital. En este contexto, los dos componentes clave son la BBU (*Baseband Unit*) y la RRU (*Remote Radio Unit*). Los nodos de acceso radio (como BBUs y RRUs) también pueden operar bajo esquemas 1+1, donde cada elemento dispone de un componente en reserva, listo para asumir la operación en caso de fallo de un módulo, redirigiéndose el tráfico sin necesidad de reiniciar o reconfigurar la estación base. Este principio se extiende incluso a las placas de control, procesadores y fuentes de alimentación, donde se garantiza la duplicidad para mantener el sistema en funcionamiento [31]. Esta arquitectura reemplaza a la BTS de generaciones anteriores como GSM-R, ofreciendo mayor flexibilidad, eficiencia y escalabilidad [51].

- La **BBU** es la unidad que se encarga del procesamiento digital de las señales de radio y de la gestión del tráfico de la estación base. Su función principal es recibir datos desde la red de transporte (*backhaul*), procesarlos y enviarlos hacia las antenas a través de las RRU [51].

Se conecta a la Red Core a mediante la estación base **gNB**, con separación de funciones entre la CU (*Centralized Unit*) y DU (*Distributed Unit*) [48].

- CU: Componente que maneja funciones de control y procesamiento de señal a nivel más alto (gestión de movilidad, control de sesiones) y la que permite la conexión directa a la Red Core.
- DU: Componente que se encarga del procesamiento base banda en tiempo real y la conexión con la RRU.

El diseño de la RAN en FRMCS no solo se basa en la evolución de la infraestructura de red, sino también en la implementación de técnicas avanzadas que optimizan la transmisión de datos, como son MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) y *beamforming* que desempeñan un papel clave en la mejora de la cobertura y la eficiencia espectral, obteniendo un *Quality of Service* (QoS) mejor, siendo esto vital para asegurar que aplicaciones críticas, como las comunicaciones de control ferroviario, reciban el nivel de servicio necesario.

- MIMO es una técnica que utiliza múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor para mejorar la capacidad y la fiabilidad de la comunicación inalámbrica. Al transmitir múltiples señales simultáneamente a través de diferentes antenas, explota la propagación para aumentar la tasa de transferencia de datos sin necesidad de ancho de banda. La diversidad espacial reduce la probabilidad de desvanecimiento de la señal, mejorando la calidad de la comunicación y aumenta la cantidad de datos transmitidos por unidad de espectro disponible [52].
- *Beamforming*: es una técnica que direcciona las señales de radio hacia dispositivos específicos en lugar de emitirlos de manera omnidireccional. Esto se logra ajustando la fase y amplitud de las señales transmitidas por cada antena en un arreglo, formando un "haz" dirigido. Mejora la cobertura al concentrar la señal en una dirección específica, minimiza las interferencias con otros dispositivos y reduce el consumo de energía [52].
- La **RRU** (también llamada RRH - *Remote Radio Head*) es la unidad de radio remota que maneja la transmisión y recepción de las señales de radiofrecuencia. Su función es tomar las señales de banda base de la BBU y convertirlas en señales RF (Radio Frecuencia) que se envían a través de las antenas. Están conectadas a la BBU mediante fibra óptica (*fronthaul*) para minimizar latencias y optimizar el rendimiento. Cada RRU puede manejar múltiples antenas, soportando configuraciones MIMO, *beamforming* y amplificación de señal RF que le permite adaptarse a diferentes necesidades de cobertura en túneles, estaciones y líneas de alta velocidad [53].

La Figura 10 ilustra de manera esquemática cómo se estructuran estos elementos dentro del sistema, mostrando su relación con otros componentes clave de la red.

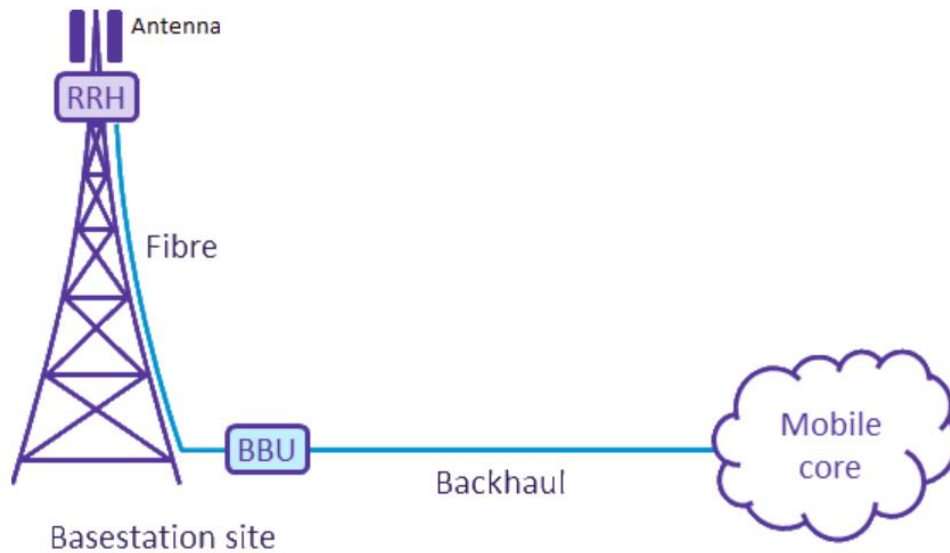


Figura 10. Esquema de Capa Radio [53]

A fin de garantizar espectro dedicado para las comunicaciones ferroviarias futuras, los organismos europeos han reservado dos **bandas de frecuencia** exclusivas para FRMCS. La banda "RMR 900" (*Railway Mobile Radio 900*) corresponde al rango tradicional de GSM-R en 900 MHz, ampliado ligeramente. En 2020 la CEPT (Comité Europeo de Postas y Telecomunicaciones) emite la decisión ECC (20)02 (*Electronic Communications Committee* (20)02 [54] y armonizó 2 x 5,6 MHz en 900 MHz (874,4–880,0 MHz *Uplink* y 919,4–925,0 MHz *Downlink*) para necesidades ferroviarias presentes y futuras. Esta porción de espectro (operada en modo FDD) fue incorporada por 3GPP en 2022 como la banda 5G **NR n100**, denominada "RMR 900" [48]. Este espectro queda representado en la Figura 11:

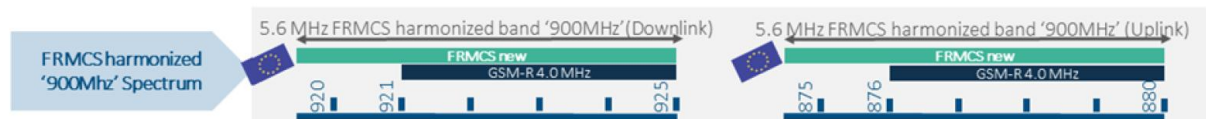


Figura 11. Espectro banda de 900 MHz [48]

Adicionalmente, se identificó que 2x5,6 MHz podrían ser insuficientes para nuevos servicios de gran ancho de banda, se asignó una segunda banda: 10 MHz en la banda de 1900 MHz (1900–1910 MHz) operada en modo TDD (*Time Division Duplex*). Esta nueva banda ferroviaria de 1900 MHz fue normalizada por 3GPP en 2022 como **NR n101**, conocida como "RMR 1900" [48]. Esta banda se muestra a continuación en la Figura 12.

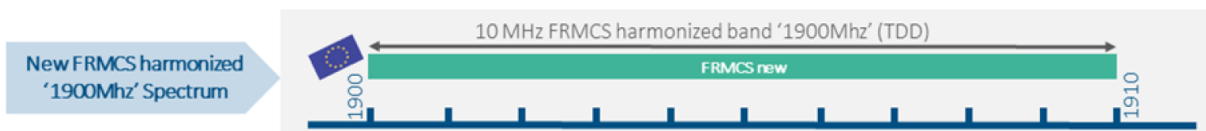


Figura 12. Espectro banda de 1900 MHz [48]

Se designa también la banda **n40** en las especificaciones de 3GPP, es utilizada para comunicaciones móviles y opera en el rango de 2300 MHz a 2400 MHz, utilizando el modo de transmisión TDD. Esta banda no está reservada exclusivamente para el sistema FRMCS, sino

que se emplea de forma generalizada en redes móviles comerciales a nivel mundial, no obstante, se plantea la posibilidad de llevar a cabo su uso en España [55]. Es utilizada tanto en despliegues LTE como 5G, especialmente en países como China, India y algunas regiones de Europa, donde se aprovecha su amplio ancho de banda para ofrecer servicios de banda ancha móvil, redes privadas y comunicaciones inalámbricas de alta capacidad. Por tanto, la banda n40 forma parte del conjunto de bandas de uso general en telecomunicaciones móviles y no está destinada de forma específica ni exclusiva al entorno ferroviario [55] [56].

Se agrupan en la Tabla 8 las bandas recién mencionadas destinadas al FRMC indicando sus frecuencias de subida y bajada, así como el ancho de banda y sus modos de transmisión.

Tabla 8. Bandas de espectro para FRMCS en Europa

Banda NR	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Ancho de Banda (MHz)	Modo de Transmisión
n100	874,4 – 880,0	919,4 – 925,0	2 x 5,6	FDD
n101	1900 – 1910	1900 – 1910	10	TDD

Estas bandas, fueron oficializadas por la Comisión Europea en 2021 mediante la Decisión de Ejecución (UE) 2021/1730. En dicha decisión se confirma que 874,4–880 MHz / 919,4–925 MHz (FDD) y 1900–1910 MHz (TDD) serán las frecuencias para FRMCS en Europa. Es importante señalar que la banda FDD 2x5,6 MHz es exclusiva del ferrocarril y hasta hace poco no formaba parte de los despliegues comerciales de 3GPP, lo que supone un reto para conseguir equipos compatibles de inmediato. En contraste, la banda TDD 1900 MHz se encuentra dentro de un rango ya usado comercialmente (parte de la LTE Band 39), facilitando la disponibilidad de dispositivos y equipos para ensayos iniciales [25].

Las dos bandas de FRMCS operan con diferentes **modos de transmisión** o que influye en cómo se gestionan las comunicaciones de subida y bajada y en las características de cobertura/capacidad. La banda n100 de 900 MHz utiliza FDD, es decir, tiene sub-bandas separadas para el enlace ascendente (tren a tierra) y descendente (tierra a tren) que pueden operar simultáneamente. En cambio, la banda n101 de 1900 MHz funciona en TDD usando un único bloque de 10 MHz en el cual el enlace ascendente y descendente se alternan en el tiempo mediante un patrón de slots compartido [48] [57].

- FDD: proporciona un canal continuo e ininterrumpido en ambas direcciones, lo que es ideal para servicios críticos de baja latencia como señalización (ETCS) y comunicaciones de voz de emergencia, ya que el tren puede transmitir y recibir simultáneamente sin esperar turnos temporales.

- TDD: ofrece flexibilidad en la asignación de capacidad: la tecnología 5G NR permite definir patrones TDD ajustables, optimizando la proporción de sub-tramas *uplink/downlink* según la necesidad de tráfico.

La tecnología 5G ha sido desarrollada para satisfacer los criterios definidos en la especificación M.2083 de la UIT-R (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Radiocomunicaciones), con el propósito de proporcionar prestaciones superiores y más avanzadas que las ofrecidas por el 4G LTE [47]. Los requisitos mínimos de rendimiento técnico especificados en el informe se detallan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Requisitos de rendimiento del sistema 5G [47]

Parámetro	Valor
Tasa máxima de datos en bajada ( <i>Downlink</i> )	20 Gbit/s
Tasa máxima de datos en subida ( <i>Uplink</i> )	10 Gbit/s
Eficiencia espectral máxima en bajada	30 bit/s/Hz
Eficiencia espectral máxima en subida	15 bit/s/Hz
Tasa de datos experimentada por el usuario en bajada	100 Mbit/s
Tasa de datos experimentada por el usuario en subida	50 Mbit/s
Eficiencia energética	Alta proporción de reposo y larga duración de reposo
Fiabilidad	$1 \cdot 10^{-5}$
Movilidad	Estacionario hasta 500 km/h

#### 2.2.2.4. Capa Terminal

Esta capa, situada en la parte inferior de la Figura 6, agrupa los sistemas de comunicación a bordo, permitiendo la conexión entre el tren y la infraestructura ferroviaria. Aunque los servicios que ofrece son similares a los de la capa de aplicación, se introduce una diferencia relevante: la cabina de radio sustituye al sistema dispatcher. Esta cabina es un componente fundamental del FRMCS, ya que funciona como interfaz principal entre el maquinista y los sistemas de comunicación embarcados. En el marco del nuevo entorno FRMCS, se está rediseñando para adaptarse a los estándares 5G definidos por 3GPP, incorporando funcionalidades MCX (como llamadas de grupo, datos o vídeo). Su evolución contempla distintas variantes de migración para facilitar la transición desde GSM-R, incluyendo configuraciones mixtas o adaptaciones modulares. A nivel técnico, la cabina se comporta como un nodo IP inteligente, capaz de comunicarse con la red de acceso y el núcleo de red, asegurando una conectividad de alta disponibilidad y baja latencia [32].

### 3. ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO

Previo al análisis y planificación de la red FRMCS, se introduce en este apartado el contexto en el que se centra el estudio, además de plantearse una serie de especificaciones y restricciones llevadas a cabo para el correcto estudio de la red FRMCS.

#### 3.1 Marco Conceptual

Para este proyecto, se ha escogido la línea de Alta Velocidad Madrid-Extremadura-Frontera Portuguesa (437 km), la cual busca conectar Madrid con Extremadura y, eventualmente, con Portugal. Esta línea forma parte del Corredor Atlántico. Consta de tres tramos: Plasencia-Cáceres-Mérida-Badajoz; Madrid-Oropesa y Talayuela-Plasencia [58].

- El tramo Plasencia-Badajoz. En julio de 2022, se inauguró parcialmente la línea entre Plasencia y Badajoz en ancho ibérico y sin electrificar. Inicialmente, los trenes Alvia alcanzaron velocidades de hasta 180 km/h. Posteriormente, en diciembre de 2023, se completó la electrificación de este tramo, permitiendo velocidades de hasta 300 km/h en las secciones de nueva construcción.
- El tramo Talayuela-Plasencia consta de dos subtramos finalizados y cinco en fase de construcción, se prevé una finalización para 2027.
- El tramo Madrid-Oropesa se encuentra en fase de estudio.

Se elige como propuesta para el presente proyecto el tramo Toledo-Talayuela, correspondiente al corredor de Alta Velocidad Madrid-Oropesa, actualmente en fase de estudio y planificación. La elección de este tramo no es aleatoria, ya que su ejecución permitiría completar la continuidad de la línea de alta velocidad, dado que los tramos Madrid-Toledo y Plasencia-Talayuela ya se encuentran ejecutados o en avanzado estado de desarrollo. En la Figura 13 se puede apreciar dicho tramo marcando en color rojo los dos túneles que hay a lo largo de esta línea.

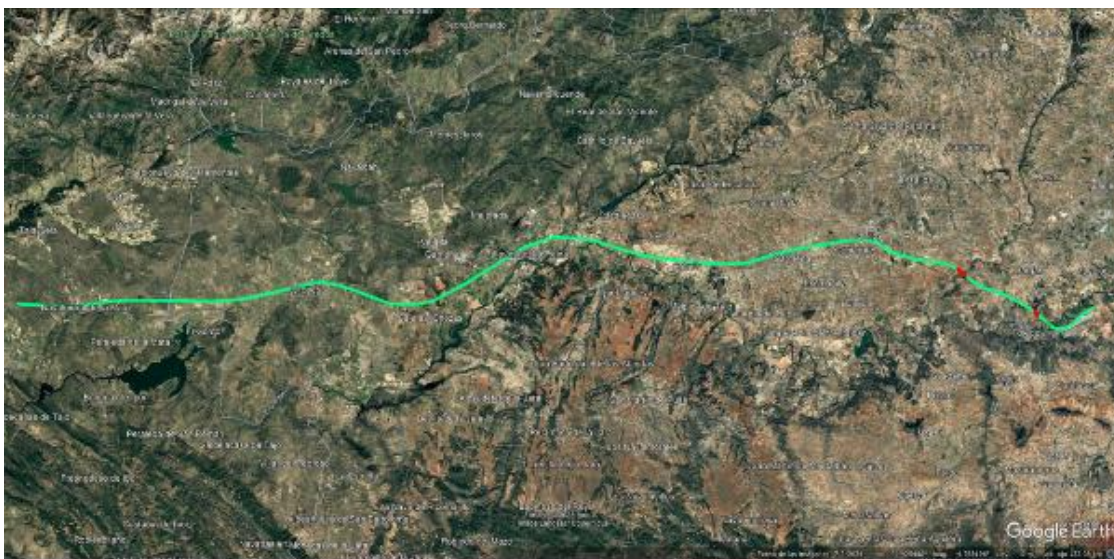


Figura 13. Posible trazado de la línea de Alta Velocidad Toledo - Talayuela

### 3.2 Especificaciones

Dado que el proceso de implementación del futuro sistema de comunicaciones móviles ferroviarias es inminente, este proyecto analiza de manera detallada la perspectiva tecnológica y económica para su implementación en el sector ferroviario.

Los detalles más relevantes de esta línea son los siguientes:

- 160 km de longitud total de línea. En configuración de doble vía con ancho UIC y electrificada.
- Dos (2) túneles que suman una distancia de 2,78 km.
- Tres (3) estaciones de viajeros: Torrijos, Talavera de la Reina y Navalmoral de la Mata.

Como se ha explicado en el estado del arte, la red de comunicaciones móviles FRMCS a planificar se descompone en dos capas, es decir, habrá emplazamientos FRMCS de la Capa A y Capa B. Se llevarán a cabo la simulación y el análisis de ambas capas.

Con el fin de realizar una simulación precisa del diseño radioeléctrico, se va a hacer uso de la herramienta de planificación radioeléctrica llamada *HTZ Communications*, la cual utiliza modelos digitales del entorno para llevar a cabo diseño y modelado de redes, cálculos de cobertura, análisis de interferencias y asignación automática de frecuencias, así como la planificación de capacidad y análisis de tráfico [59].

Así mismo, se ha diseñado, siguiendo las especificaciones de ADIF, el diseño de la arquitectura de red fija (tendido de cables de Fibra óptica y red de comunicaciones fijas IP) que sirve para la gestión del tráfico de todos los emplazamientos FRMCS proyectados junto con el diseño de la red de energía para su suministro eléctrico.

### **3.3 Restricciones**

Con respecto a las restricciones de condicionantes y supuestos de partida del presente proyecto, se han tenido en cuenta las siguientes limitaciones:

- La simulación llevada a cabo ha sido exclusivamente examinada en la línea de Alta Velocidad comentada.
- En base a conocimientos y simulaciones previas, los emplazamientos se ubican aproximadamente cada 2,5 km. Esta variación dependerá de la orografía y de las condiciones particulares de cada uno de los emplazamientos a visitar en un futuro replanteo de la obra.
- El objetivo del proyecto se centra exclusivamente en el despliegue de los emplazamientos necesarios para las comunicaciones tierra-tren. No obstante, será responsabilidad de los Operadores Ferroviarios establecer un plan de migración de las cabinas de radio interiores en todos los trenes, con el fin de garantizar la compatibilidad con este futuro servicio.
- En la línea ferroviaria analizada se encuentran dos túneles, marcados en rojo en la vía. Estos no pueden ser simulados en su interior mediante el software HTZ, ya que el programa no lo permite y quedan fuera del alcance del análisis.
- La restricción en cuanto al nivel de señal requerido establece, en el caso de GSM-R, un umbral de -85 dBm según los criterios de ADIF. Sin embargo, para FRMCS este valor aún no ha sido definido oficialmente. Se proyecta que el nivel mínimo de señal podría situarse en torno a los -95 dBm, debido a la mayor sensibilidad de los terminales 5G que se utilizarán en este nuevo sistema.
- Aunque en la actualidad los emplazamientos de red aún no han sido construidos, se ha trabajado con ubicaciones simuladas y técnicamente viables, definidas en base a criterios de planificación radioeléctrica y orografía del terreno. No se incluyen coordenadas exactas en este documento con el fin de preservar la seguridad de futuras infraestructuras críticas y evitar cualquier riesgo potencial que pueda comprometer las comunicaciones ferroviarias, especialmente en una línea donde se prevé la circulación de trenes a velocidades superiores a 300 km/h con pasajeros a bordo. No obstante, dichos datos han sido considerados internamente durante el desarrollo del proyecto para garantizar la precisión y consistencia de la simulación.

## 4. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

### 4.1 Parámetros Generales

Para simular el despliegue de la red móvil FRMCS en el tramo ferroviario estudiado, se ha empleado la herramienta profesional **HTZ Communications**, que permite modelar escenarios radioeléctricos complejos mediante un sistema de capas como se muestra en la Figura 14. Estas capas son necesarias para obtener la simulación radioeléctrica completa necesitándose una licencia profesional y permite cargar distintos archivos que representan información geográfica y técnica del entorno de simulación, como el modelo digital de elevación, la cartografía, la capa de *clutter*, la red ferroviaria y las estaciones base (BTS).

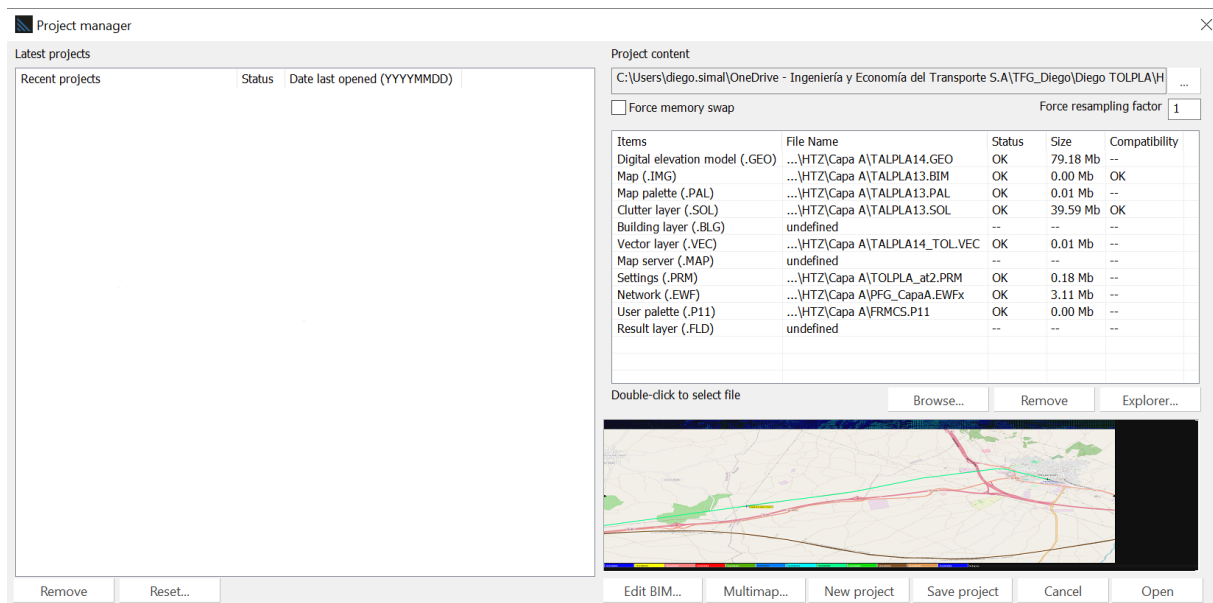


Figura 14. Creación del proyecto

La capa *clutter* resulta especialmente relevante en este tipo de simulaciones, ya que define las características físicas del terreno por cada píxel del mapa. Para cada tipo de entorno (zonas rurales, urbanas, bosques, interiores, etc.) se asignan valores específicos de atenuación, altura, reflexión y otros parámetros que afectan directamente a la propagación de la señal. Esta información se complementa con un modelo de propagación, que considera pérdidas adicionales por difracción en situaciones con obstáculos como montañas, edificios o viaductos, ajustando así la fiabilidad de la simulación a entornos reales.

Posteriormente, para realizar la simulación radioeléctrica de cada uno de los emplazamientos se configura cada estación base de manera individual de la forma en la que aparece en la Figura 15, donde se detalla la potencia (fijada en 20W) total emitida desde el transmisor. Esta potencia se ve afectada por las pérdidas en transmisión (1 dB), recepción (2 dB) y pérdidas adicionales (4,5 dB), generando un valor final de EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power* o Potencia Radiada Isotrópica Equivalente) de aproximadamente 468,85 W. Este valor refleja la potencia efectiva que se irradia teniendo en cuenta la ganancia de las antenas, de 19,2 dBi. En esta misma figura también se aprecia la altura de antena seleccionada para este

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

emplazamiento específico número 1 de la capa A es de 40 metros, lo que contribuye a una mayor visibilidad radioeléctrica y reducción de obstáculos.

The screenshot shows a software interface for configuring a base station. The title bar reads 'Tx/Rx parameters: 8 01A'. The interface has tabs for 'General', 'Patterns', 'Channels', 'Site', and 'gNB'. The 'General' tab is active. At the top, there are dropdown menus for 'Type' (Tx/Rx A (0)), 'Signal' (5G TDD (104)), 'Status' (Unknown (0)), and 'Frequency plan' (# 8), along with an 'activated' status indicator. The main area is divided into three columns: 'Tx/Rx' parameters, 'Coverage' settings, and 'Info' fields. The 'Tx/Rx' section includes fields for Power/Beam (20), Dynamic (10), Tx and Rx antenna gains (19.20), Losses (1.00 tx, 2.00 rx), Tx add losses (4.50), EIRP (468.8458), Frequency (1900.000000), Antenna height (40.00), Tx bandwidth (10000.00), and Rx bandwidth (10000.00). The 'Coverage' section shows 'P.526-11' with 'Delete' and 'info' buttons, and radio buttons for 'Variable power', 'Fixed power', 'Fixed frequency', 'Freq Hop / WB', 'Variable elevation', and 'Fixed elevation'. The 'Info' section includes 'Callsign' (01A), 'Parenting' (0), 'Address', 'Date' (20241031), 'Inf1' (Capa A), 'Type ID', 'Inf2' (Sec2), 'Link', 'Network ID', 'Group', 'User', 'Call number' (0), and 'Date: start / end' (0 / 0). A 'Comment:' field is at the bottom left, and 'Aceptar' and 'Cancelar' buttons are at the bottom right.

Figura 15. Parámetros de la estación base FRMCS

La transmisión se realiza en modo 5G TDD, en la frecuencia de 1900 MHz, dentro de un ancho de banda de 10 MHz tanto en subida como en bajada. Esta configuración permite un equilibrio entre alcance, penetración y capacidad de datos, siendo adecuada para entornos de alta movilidad como el ferroviario.

Para una correcta simulación radioeléctrica los pasos a seguir han sido:

- Situar los emplazamientos cerca de la vía y con acceso para su construcción.
- Configurar los parámetros indicados anteriormente en la Figura 15 al igual que los que aparecen en la Figura 16 en cada estación base.

Para garantizar una cobertura continua a lo largo de todo el trazado ferroviario, el diseño de la red se ha basado en el ajuste cuidadoso de varios parámetros clave en cada estación base. En concreto, se ha trabajado de forma iterativa sobre la orientación de las antenas (*azimut*), el ángulo de inclinación (*tilt*) reflejados en el emplazamiento de la Figura 16 y la altura de las torres, con el objetivo de optimizar la propagación de la señal en función de las características del terreno.

Esta metodología ha permitido ajustar cada emplazamiento a las características del terreno en el que se encuentra, logrando así una cobertura más eficaz. En los casos en los que estos ajustes no resultaban suficientes para cubrir por completo determinados tramos, se ha procedido a modificar la distancia entre emplazamientos, reduciéndola para incrementar la

densidad de estaciones base y asegurar así la cobertura total tanto en la capa A como en la capa B.

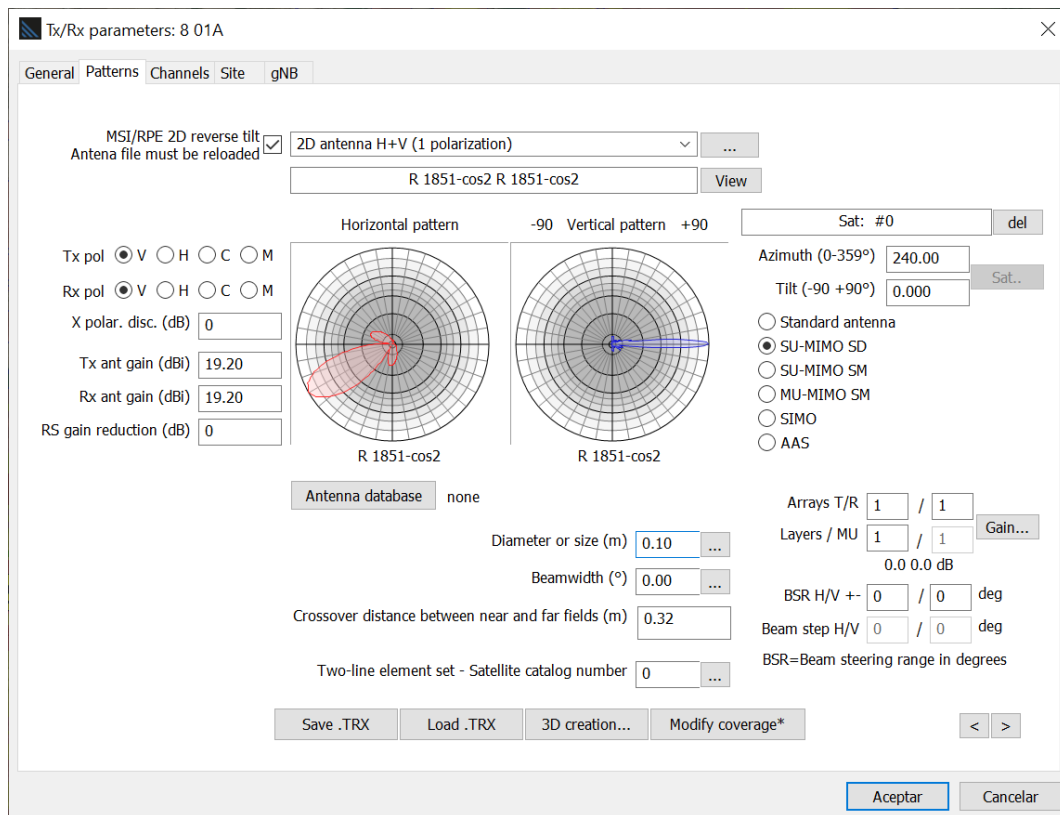


Figura 16. Patrón de radiación de las antenas

Este enfoque combinado ha permitido obtener un diseño robusto, adaptado a los estándares exigidos por el entorno ferroviario de alta velocidad, y alineado con los objetivos de disponibilidad y fiabilidad del sistema. Una vez finalizada esta fase de configuración, se procede con la planificación radio, la cual se detalla a continuación.

## 4.2 Cobertura Radioeléctrica Capa A

La solución que se ha planificado y se proyecta para la Capa A en la sección de línea mostrada anteriormente en la Figura 13 consta de cuarenta y ocho (48) emplazamientos de FRMCS incluyendo también tres (3) cabezas remotas que funcionan a modo repetidor localizándose estas últimas en los túneles. Estos emplazamientos se muestran en la Tabla 10 con sus características generales tal y como: la altura de las antenas en las torres, tipo de antena, sus azimut y tilt correspondientes por emplazamiento y el PK (Punto Kilométrico) en el que se encuentra cada uno de ellos, quedando constancia también de esto en el Anexo A2 Tira de Vía Infraestructura.

Nota: Se toma como referencia el PK [0 + 000] (km + m) el primer emplazamiento de la Capa A de la línea, siendo este valor y los consiguientes demostrativos para el alcance del proyecto, adaptándose a futuro en la línea Madrid-Oropesa a sus correspondientes PKs.

Tabla 10. Resumen de emplazamientos Toledo - Talayuela Capa A

Nombre Emplazamiento	PK [km + m]	Lado de Vía	Altura (m)	Tipo Antenas	Azimut (°)		Tilt (°)	
					Sec1	Sec2	Sec1	Sec2
BTS 01A	0+000	Derecho	40	X30	45	240	0	0
BTS 02A	2+712	Derecho	30	X30	50	230	0	0
BTS 03A	4+693	Derecho	20	X30	55	260	0	0
BTS 04A	6+355	Derecho	30	X30	60	290	0	0
RRH 04.01A	9+989	Derecho	5	Helicoidal	120	-	0	-
RRH 04.02A	10+917	Derecho	5	Helicoidal	-	290	-	0
BTS 05A	12+665	Derecho	35	X30	125	300	0	0
BTS 06A	14+506	Derecho	40	X30	115	290	0	0
BTS 07A	17+865	Derecho	40	X30	105	280	0	0
BTS 08A	20+068	Derecho	30	X30	120	310	0	0
RRH 08.01A	21+380	Derecho	5	Helicoidal	-	300	0	0
BTS 09A	26+169	Derecho	30	X30	105	275	0	-5
BTS 10A	28+577	Derecho	30	X30	115	280	0	-5
BTS 11A	30+126	Derecho	30	X30	105	280	0	-5
BTS 12A	31+868	Derecho	40	X30	80	290	0	0
BTS 13A	34+185	Derecho	20	X30	85	285	-2	-2
BTS 14A	36+609	Derecho	20	X30	80	275	0	0
BTS 15A	39+367	Derecho	40	X30	80	260	0	0
BTS 16A	41+540	Derecho	40	X30	85	260	0	-3
BTS 17A	45+263	Derecho	40	X30	80	260	-2	2

*DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA*

Nombre Emplazamiento	PK [km + m]	Lado de Vía	Altura (m)	Tipo Antenas	Azimut (°)		Tilt (°)	
					Sec1	Sec2	Sec1	Sec2
BTS 18A	47+975	Derecho	40	X30	80	260	0	-5
BTS 19A	50+738	Derecho	40	X30	80	250	0	-3
BTS 20A	53+020	Derecho	40	X30	75	265	0	0
BTS 21A	56+030	Derecho	40	X30	85	270	0	0
BTS 22A	58+488	Derecho	40	X30	95	270	0	0
BTS 23A	61+712	Derecho	35	X30	95	280	0	0
BTS 24A	64+725	Derecho	25	X30	95	280	0	0
BTS 25A	67+196	Derecho	40	X30	100	285	-5	0
BTS 26A	70+015	Derecho	25	X30	105	290	0	-5
BTS 27A	72+783	Derecho	30	X30	110	285	0	-5
BTS 28A	76+611	Derecho	20	X30	100	275	0	2
BTS 29A	79+160	Derecho	35	X30	95	255	0	-3
BTS 30A	82+407	Derecho	25	X30	75	255	0	0
BTS 31A	84+273	Derecho	20	X30	75	255	0	0
BTS 32A	86+636	Derecho	35	X30	50	235	0	1
BTS 33A	88+772	Derecho	40	X30	60	240	0	0
BTS 34A	90+897	Derecho	40	X30	50	245	0	0
BTS 35A	94+319	Derecho	30	X30	55	250	0	-5
BTS 36A	97+382	Derecho	40	X30	70	235	-5	-5
BTS 37A	100+024	Derecho	40	X30	75	260	0	0
BTS 38A	102+571	Derecho	40	X30	90	275	0	-5
BTS 39A	104+863	Derecho	40	X30	90	285	0	0
BTS 40A	107+660	Derecho	40	X30	110	285	0	0
BTS 41A	110+270	Derecho	40	X30	110	285	0	0
BTS 42A	115+935	Derecho	30	X30	95	255	0	0
BTS 43A	121+935	Derecho	30	X30	85	265	0	0
BTS 44A	128+524	Derecho	35	X30	90	265	0	0
BTS 45A	135+933	Derecho	30	X30	90	270	0	0
BTS 46A	141+072	Derecho	30	X30	90	260	0	-5
BTS 47A	145+457	Derecho	35	X30	90	255	0	0
BTS 48A	153+227	Derecho	30	X30	95	270	0	0

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

De esta Tabla correspondiente a la capa A cabe destacar:

- En la simulación se ha empleado una antena con polarización cruzada con ancho de haz de 30°, cuya configuración estrecha permite una mayor directividad sobre el eje de vía. Se adjunta el *datasheet* de la misma en el Anexo A1 *Datasheet* de la Antena.
- Se ha logrado ubicar todas las estaciones base (BTS) en el margen derecho de la vía, siguiendo una recomendación habitual en la planificación de redes. Esta estrategia consiste en asignar una capa por cada lado de la vía, lo que permite una distribución más ordenada de la infraestructura. De este modo, tanto el cableado de energía como el de fibra óptica pueden desplegarse de forma independiente a través de sus respectivas canaletas o canalizaciones, facilitando así el mantenimiento y reduciendo cruces de vía.

Una vez definidas todas las características de infraestructura más importantes de los emplazamientos en la Tabla 10, se procede a analizar la cobertura radioeléctrica de la capa A tras haberse llevado a cabo la simulación. El procedimiento a seguir va a ser la superposición de imágenes enlazando emplazamientos desde el comienzo en Toledo hasta sobrepasar la estación de Navalморal de la Mata, previo a Talayuela. Para la cobertura radioeléctrica, se ha usado la paleta de colores que se muestra en la Figura 17. Se incluirá en la parte superior de las capturas como referencia visual, funcionando como una leyenda para facilitar su interpretación.

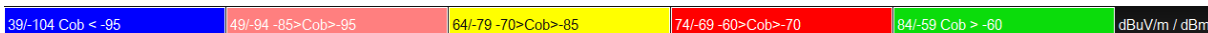


Figura 17. Relación entre niveles de cobertura y colores

Esta paleta es utilizada para representar los niveles de señal en dBuV/m o dBm en los mapas de cobertura. Los valores están segmentados en rangos de intensidad. Se pueden ver desglosados en la Figura 18, permitiendo visualizar la calidad de la cobertura en diferentes áreas del trayecto ferroviario.

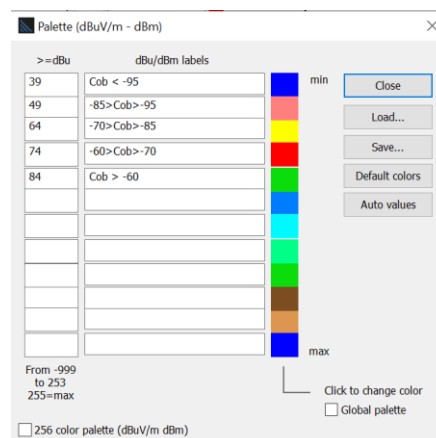


Figura 18. Paleta de colores e intensidad de campo

Cada color representa un rango de intensidad de señal en dBm, utilizado como referencia para evaluar la cobertura radioeléctrica simulada:

- **Verde (Cobertura > -60 dBm):** Nivel excelente de señal, óptimo para todo tipo de servicios y aplicaciones ferroviarias críticas.
- **Rojo (-70 dBm < Cobertura ≤ -60 dBm):** Cobertura buena y estable, compatible con comunicaciones críticas.
- **Amarillo (-85 dBm < Cobertura ≤ -70 dBm):** Cobertura moderada. Considerada válida por los estándares EIRENE para líneas de Alta Velocidad si se mantiene una disponibilidad ≥ 95%.
- **Rosa (-95 dBm < Cobertura ≤ -85 dBm):** Cobertura en el umbral inferior, que puede considerarse marginalmente aceptable en entornos rurales o con terminales modernos de alta sensibilidad (5G), como los previstos para el sistema FRMCS. Aunque está por debajo del umbral tradicional de GSM-R, su uso es admisible en escenarios donde se prioriza la continuidad general del servicio y se complementa con medidas de redundancia.
- **Azul (Cobertura ≤ -95 dBm):** Cobertura no aceptable. Señal insuficiente para garantizar comunicaciones estables y seguras.

En las representaciones cartográficas utilizadas en este proyecto, se ha aplicado una escala gráfica de **1:250**, lo que implica que cada unidad de medida en el mapa equivale a 250 unidades reales sobre el terreno.

En la Figura 19 se presenta el resultado de la cobertura radioeléctrica para el primer tramo del recorrido, comprendido entre los emplazamientos 01A y 07A. La traza ferroviaria está representada mediante una línea verde continua, sobre la cual se evalúa exclusivamente la cobertura, descartando zonas ajenas al trazado.

La simulación refleja que la señal a lo largo de la vía se mantiene mayoritariamente por encima del umbral de -85 dBm, lo cual indica una cobertura adecuada conforme a los criterios establecidos por ADIF. No obstante, es importante destacar que, en el entorno de los emplazamientos 04A y 05A, pueden apreciarse zonas puntuales donde el nivel de señal desciende y se aproxima a ese umbral, especialmente en áreas topográficamente desfavorables. A pesar de ello, la continuidad de la cobertura se mantiene gracias al adecuado solapamiento entre las celdas adyacentes.

Además, debe señalarse que existe un tramo en túnel en esta sección del trayecto, el cual no ha sido objeto de simulación en este estudio. Las antenas ubicadas en los extremos del túnel están configuradas para radiar únicamente hacia el exterior, por lo que el comportamiento de la señal en el interior del túnel queda fuera del alcance de este análisis.

Este tramo se caracteriza por una topografía variada, lo que ha exigido una distribución estratégica de los emplazamientos para garantizar una cobertura continua. En aquellos casos donde la señal no alcanzaba a cubrir completamente la distancia entre dos estaciones consecutivas, se procedió a reducir la separación entre torres o a ajustar la altura de las

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

mismas, con el fin de optimizar el alcance y minimizar zonas de sombra. Esta metodología, ya descrita en apartados anteriores, ha permitido mantener la cobertura dentro de los márgenes exigidos, evitando solapamientos excesivos y asegurando una transición fluida entre celdas.

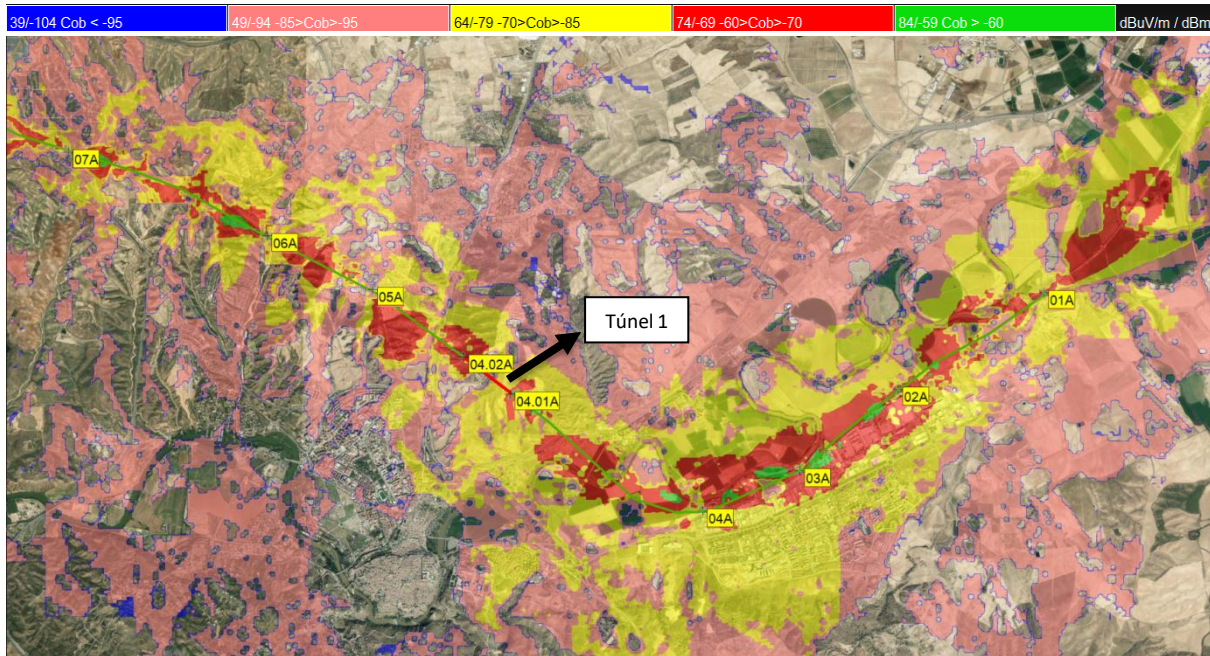


Figura 19. Cobertura Radioeléctrica TOL-TAL Capa A (1)

En este tramo, comprendido entre los emplazamientos 07A y 14A, se observa una cobertura mayoritariamente buena a lo largo de la vía ferroviaria en la Figura 20. La señal se mantiene principalmente en el rango de -70 dBm a -85 dBm, cumpliendo con el umbral mínimo establecido por ADIF y con proyección favorable hacia FRMCS.

Además, se detectan tramos por encima de -70 dBm que reflejan una mejora en la calidad de señal, especialmente en las proximidades de los emplazamientos. No se identifican zonas con niveles inferiores a -85 dBm, lo que indica que no hay problemas de sombra radioeléctrica en este segmento. Como en el resto del análisis, los posibles tramos en túnel no se han simulado y quedan fuera de la evaluación. Se vuelve a utilizar una única antena al finalizar el túnel que radia hacia el exterior.

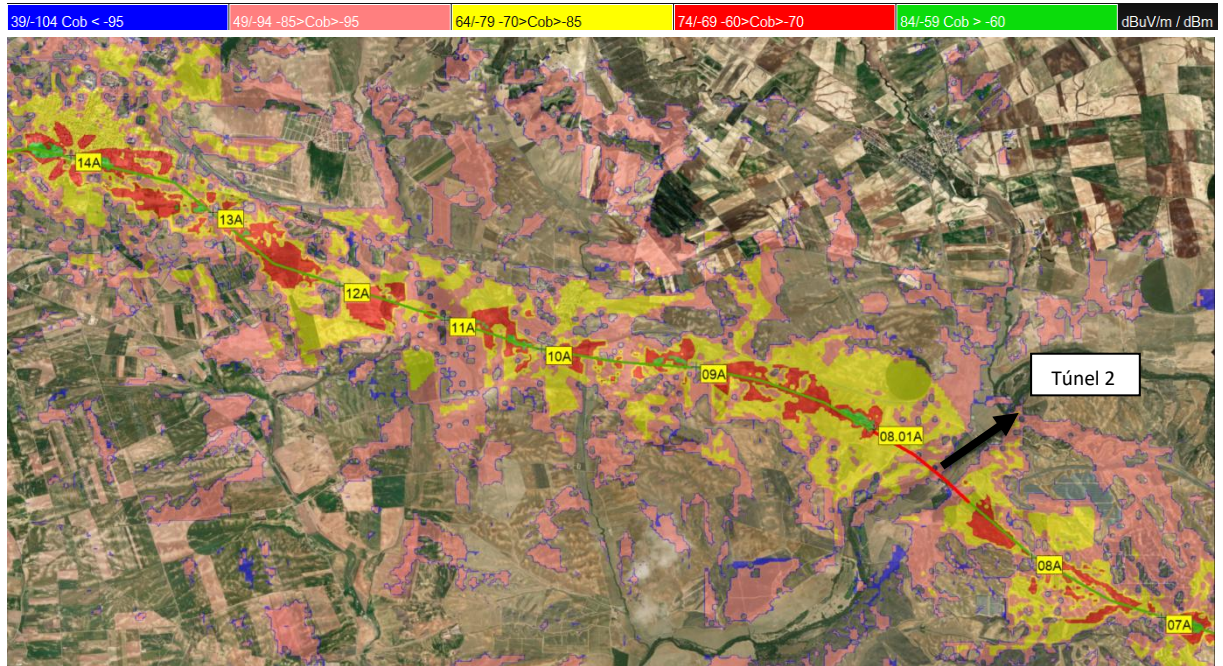


Figura 20. Cobertura Radioeléctrica TOL-TAL Capa A (2)

El tramo entre los emplazamientos 14A y 20A presenta una cobertura radioeléctrica globalmente adecuada. La mayoría de la vía ferroviaria discurre entre los -70 dBm y -85 dBm. En las inmediaciones de los emplazamientos se alcanzan niveles mejores de cobertura, lo que asegura una comunicación robusta en esos puntos. De forma puntual se detectan pequeñas discontinuidades de señal en los extremos del tramo, aunque en ningún caso la vía mostrada en la Figura 21 cae por debajo de -95 dBm, lo que garantiza la continuidad de servicio.

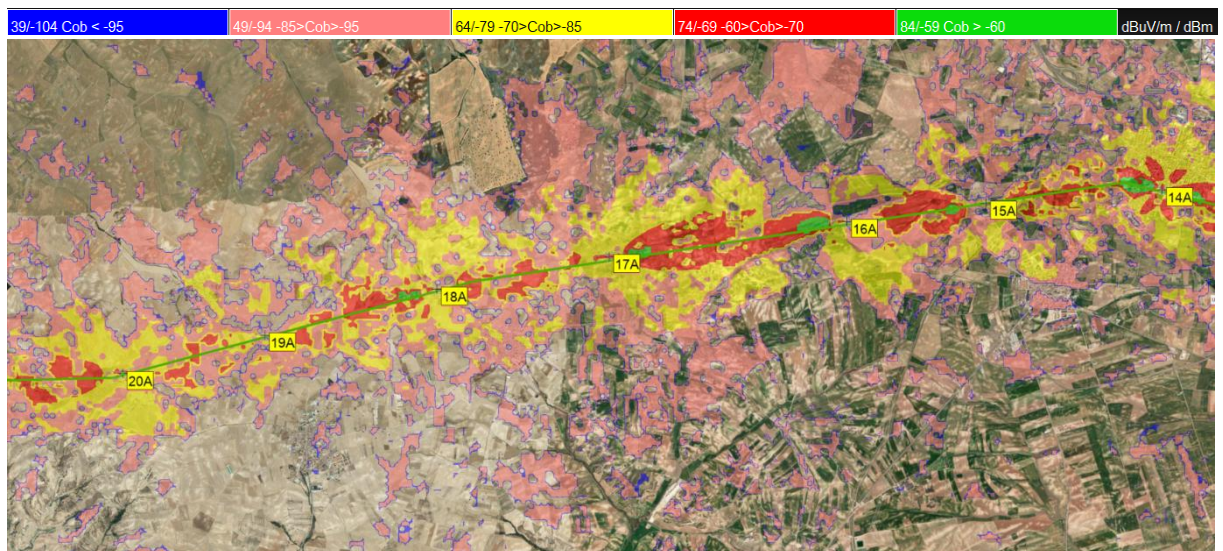


Figura 21. Cobertura Radioeléctrica TOL-TAL Capa A (3)

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En el segmento comprendido entre los emplazamientos 20A y 26A, la cobertura vuelve a mantenerse dentro de márgenes adecuados y no se observan pérdidas significativas de cobertura como se aprecia en la Figura 22.

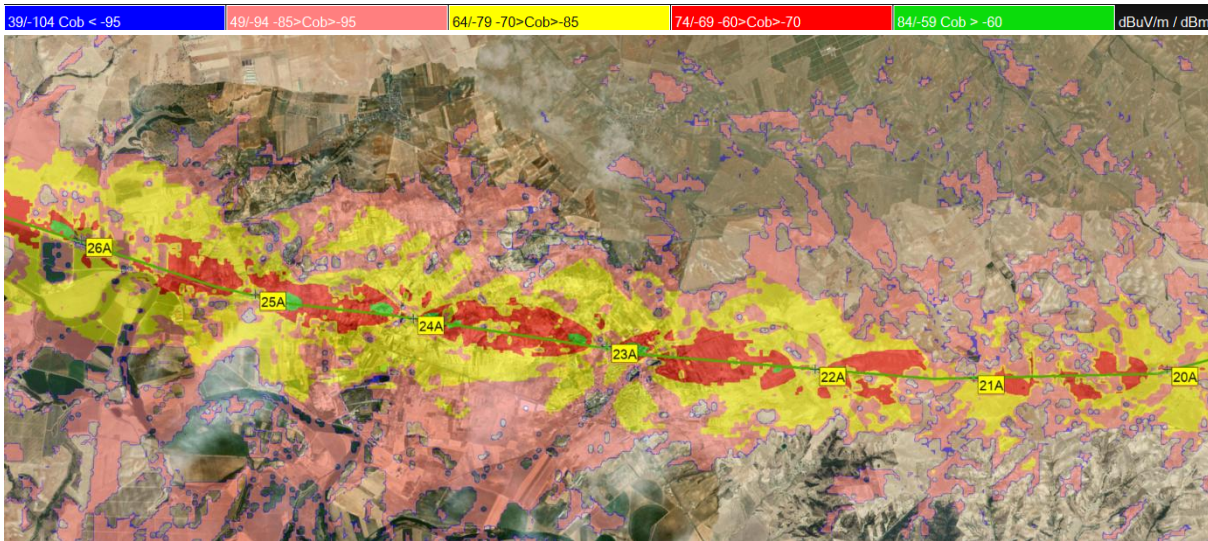


Figura 22. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (4)

En la Figura 23 se muestran los emplazamientos 26A a 33A. La cobertura es correcta en todo este tramo exceptuando la llegada a Talavera de la Reina. Se observa una pérdida de cobertura a medida que el trazado ferroviario se aproxima a la entrada de la ciudad, causada principalmente por la alta densidad de edificaciones en la zona urbana, lo que provoca una mayor atenuación de la señal.

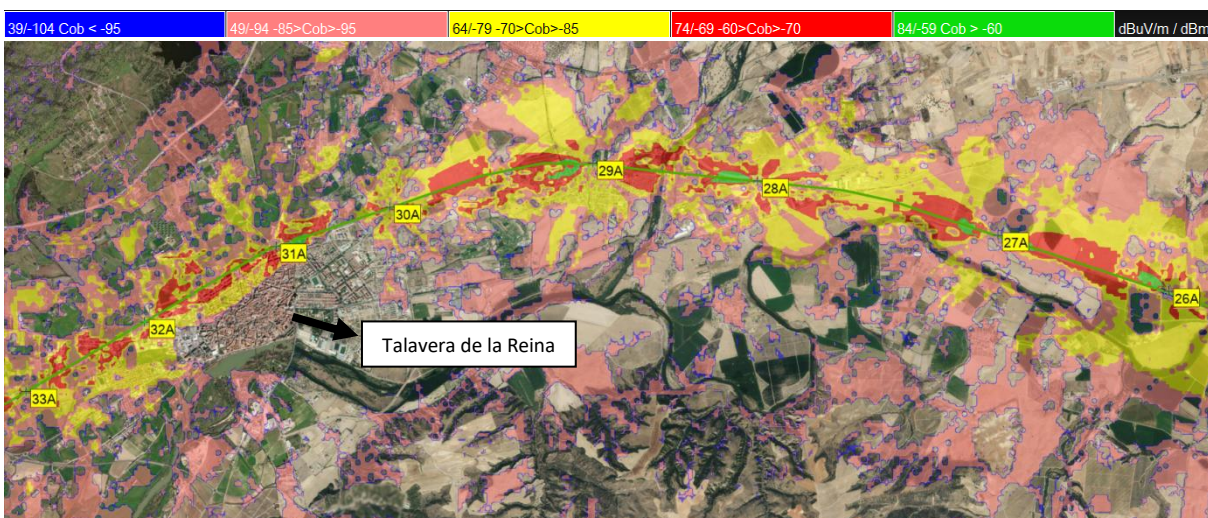


Figura 23. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (5)

Este tramo representado en la Figura 24 cumple con los requisitos de cobertura, siendo estos óptimos alrededor de la vía durante todo el tramo.

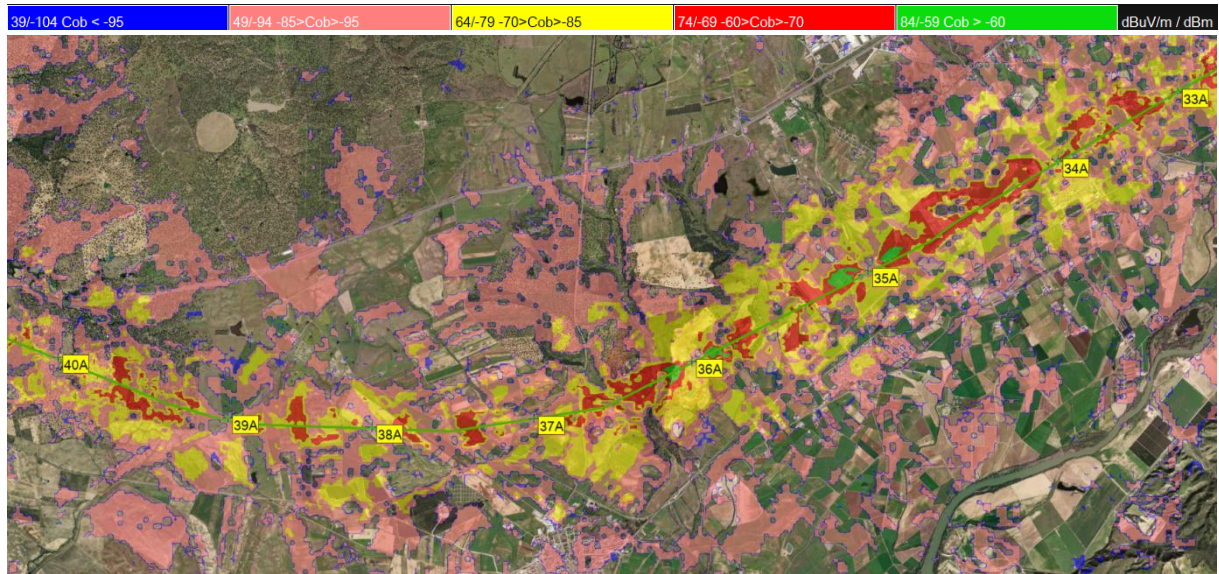


Figura 24. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (6)

Los emplazamientos de la Figura 25 muestran una mayor cobertura a lo ancho de la vía comparado a las figuras anteriores. Esto se debe a la llegada inminente de la Submeseta Sur de la Península Ibérica, siendo una zona mayoritariamente llana, con pocas elevaciones, lo que deriva en un aumento de distancia entre los emplazamientos.

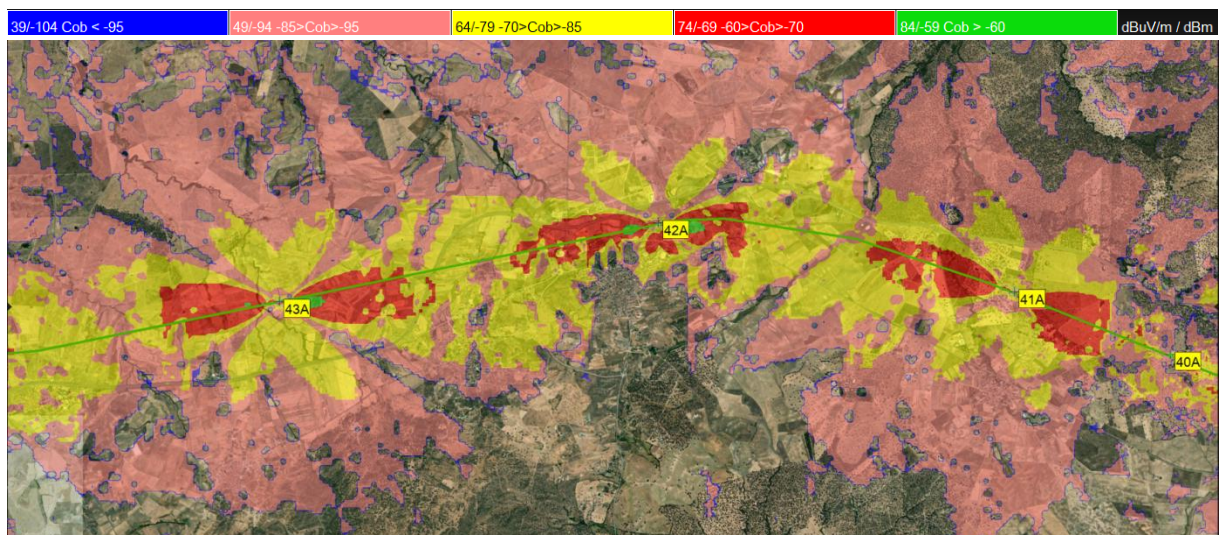


Figura 25. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (7)

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

La Figura 26 y Figura 27 muestran el fin de la línea alcanzando la estación de Navalmodal de la Mata, siendo la cobertura consistente y confirmando unos excelentes niveles en las inmediaciones de los emplazamientos.

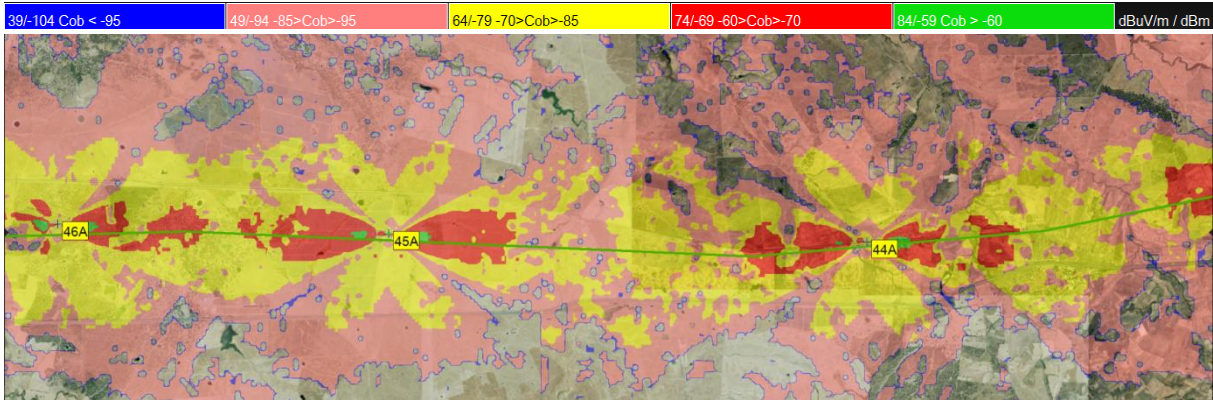


Figura 26. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (8)

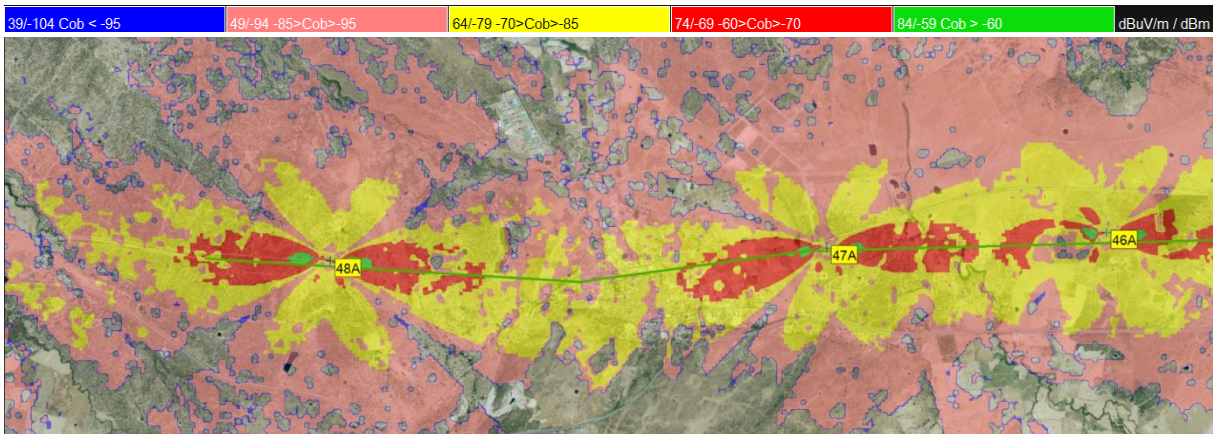


Figura 27. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa A (9)

### 4.3 Cobertura Radioeléctrica Capa B

Al igual que en la Capa A, para la Capa B se ha llevado a cabo una planificación detallada con el objetivo de garantizar una cobertura complementaria a lo largo del trazado ferroviario. Esta segunda capa consta de cuarenta y nueve (49) emplazamientos FRMCS distribuidos estratégicamente, junto con dos (2) cabezas remotas adicionales situadas en zonas de túneles, cuya función es actuar como repetidores para asegurar la continuidad de la señal en su interior.

En la Tabla 11 se recogen los principales parámetros técnicos de estos emplazamientos, incluyendo la altura de las antenas, el tipo y configuración de estas, los valores de azimut y tilt, así como la referencia al Punto Kilométrico correspondiente a cada localización. Toda esta información ha sido determinada siguiendo los mismos criterios de diseño aplicados en la Capa A, pero considerando las necesidades específicas de cobertura en aquellas zonas donde la red principal pudiera presentar degradación por factores como orografía, núcleos urbanos o zonas con obstáculos naturales.

La Capa B permite así reforzar la disponibilidad del sistema y asegurar la continuidad del servicio ante posibles fallos o tareas de mantenimiento en alguno de los emplazamientos de la Capa A. Esta arquitectura a doble capa es habitual en entornos ferroviarios de misión crítica, como el que plantea FRMCS, y está alineada con las recomendaciones de seguridad y fiabilidad definidas por ADIF y los estándares europeos.

Tabla 11. Resumen de emplazamientos Toledo - Talayuela Capa B

Nombre Emplazamiento	PK [km + m]	Lado de Vía	Altura (m)	Tipo Antenas	Azimut (°)		Tilt (°)	
					Sec1	Sec2	Sec1	Sec2
BTS 01B	1+534	Izquierdo	40	X30	45	240	0	-5
BTS 02	3+312	Izquierdo	35	X30	55	245	0	0
BTS 03B	5+471	Izquierdo	25	X30	50	265	0	0
BTS 04B	8+525	Izquierdo	40	X30	125	310	0	0
RRH 04.01B	10+024	Izquierdo	5	Helicoidal	-	300	0	0
BTS 05B	13+454	Izquierdo	35	X30	120	300	0	0
BTS 06B	16+096	Izquierdo	35	X30	125	290	0	0
BTS 07B	18+946	Izquierdo	30	X30	110	290	0	-5
BTS 08B	20+550	Izquierdo	25	X30	120	300	0	0
RRH 09.01B	23+293	Izquierdo	5	Helicoidal	-	285	0	0
BTS 09B	24+856	Izquierdo	35	X30	120	275	0	0
BTS 10B	27+436	Izquierdo	40	X30	105	580	0	-5
BTS 11B	29+713	Izquierdo	30	X30	115	290	-5	0
BTS 12B	31+326	Izquierdo	30	X30	105	290	0	0

*DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA*

Nombre Emplazamiento	PK [km + m]	Lado de Vía	Altura (m)	Tipo Antenas	Azimut (°)		Tilt (°)	
					Sec1	Sec2	Sec1	Sec2
BTS 13B	33+485	Izquierdo	30	X30	115	300	0	0
BTS 14B	35+121	Izquierdo	30	X30	120	275	0	-2
BTS 15B	38+287	Izquierdo	20	X30	80	260	0	0
BTS 16B	40+630	Izquierdo	40	X30	85	260	0	0
BTS 17B	43+546	Izquierdo	25	X30	85	260	0	0
BTS 18B	46+260	Izquierdo	40	X30	80	255	0	0
BTS 19B	49+377	Izquierdo	40	X30	75	255	0	0
BTS 20B	51+933	Izquierdo	40	X30	75	255	0	-2
BTS 21B	54+367	Izquierdo	40	X30	80	270	0	-2
BTS 22B	57+088	Izquierdo	40	X30	90	275	0	0
BTS 23B	59+380	Izquierdo	40	X30	95	275	0	0
BTS 24B	62+310	Izquierdo	40	X30	95	275	0	0
BTS 25B	65+482	Izquierdo	40	X30	100	280	0	0
BTS 26B	68+416	Izquierdo	40	X30	100	290	0	0
BTS 27B	71+524	Izquierdo	40	X30	105	285	0	0
BTS 28B	74+355	Izquierdo	35	X30	105	280	0	0
BTS 29B	77+900	Izquierdo	30	X30	95	275	0	0
BTS 30B	80+655	Izquierdo	35	X30	95	255	0	0
BTS 31B	83+505	Izquierdo	30	X30	75	240	0	0
BTS 32B	86+200	Izquierdo	20	X30	60	250	0	0
BTS 33B	88+300	Izquierdo	30	X30	60	240	0	0
BTS 34B	90+385	Izquierdo	30	X30	65	245	0	0
BTS 35B	93+885	Izquierdo	35	X30	65	245	0	0
BTS 36B	96+685	Izquierdo	40	X30	55	250	0	0
BTS 37B	98+765	Izquierdo	40	X30	55	235	0	0
BTS 38B	101+250	Izquierdo	40	X30	75	265	0	-5
BTS 39B	103+610	Izquierdo	35	X30	90	270	0	-5
BTS 40B	105+960	Izquierdo	40	X30	95	290	0	-2
BTS 41B	109+035	Izquierdo	30	X30	105	285	0	0
BTS 42B	113+615	Izquierdo	30	X30	110	270	0	0
BTS 43B	117+530	Izquierdo	30	X30	85	260	0	0
BTS 44B	123+425	Izquierdo	30	X30	80	260	0	0

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

Nombre Emplazamiento	PK [km + m]	Lado de Vía	Altura (m)	Tipo Antenas	Azimut (°)		Tilt (°)	
					Sec1	Sec2	Sec1	Sec2
BTS 45B	130+160	Izquierdo	35	X30	80	265	0	0
BTS 46B	138+530	Izquierdo	35	X30	95	270	0	0
BTS 47B	142+330	Izquierdo	30	X30	90	270	0	0
BTS 48B	147+405	Izquierdo	35	X30	90	260	0	0
BTS 49B	155+475	Izquierdo	30	X30	95	270	0	0

El procedimiento del análisis de la cobertura radioeléctrica de la capa B va a ser el mismo empleado que para la capa A. La paleta de colores que se muestra en la Figura 17 y Figura 18 sigue siendo la utilizada en esta capa. Se incluirá en la parte superior de las capturas como referencia visual, funcionando como una leyenda para facilitar su interpretación.

En este primer tramo de la capa B, se observa en la Figura 28 que la cobertura sobre la vía es muy buena. Al igual que en la capa A, no se simula el interior de los túneles.

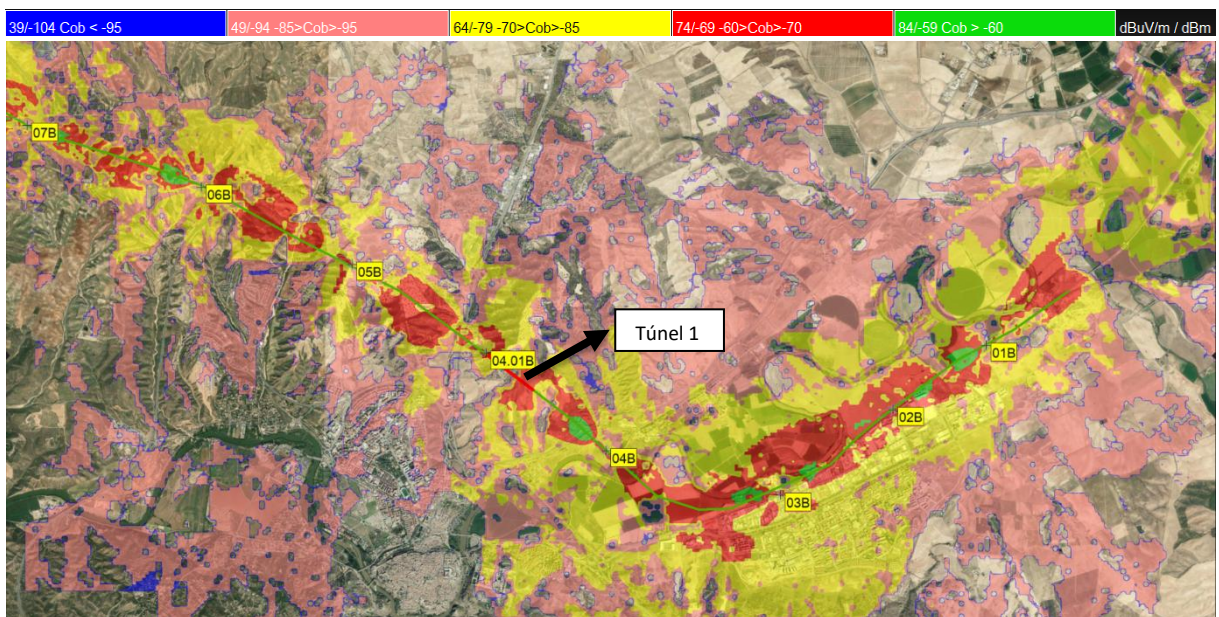


Figura 28. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (1)

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En el tramo comprendido entre los emplazamientos 07B y 14B, se aprecia que la cobertura a lo largo del trazado ferroviario simulado se mantiene mayoritariamente por encima de los -85 dBm, como puede apreciarse en la Figura 29.

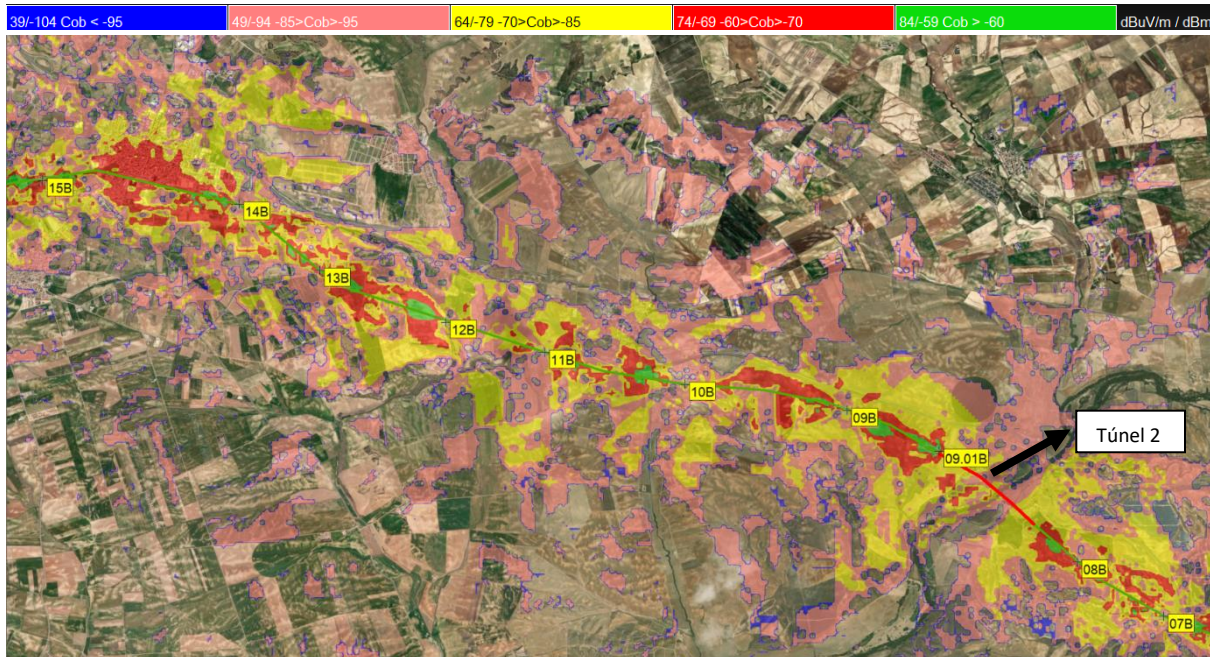


Figura 29. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (2)

En este tramo medio del trazado en la Figura 30 se observa una cobertura relativamente continua, con niveles de señal que, en su mayor parte, se mantienen dentro del rango esperado por encima de los -95 dBm.

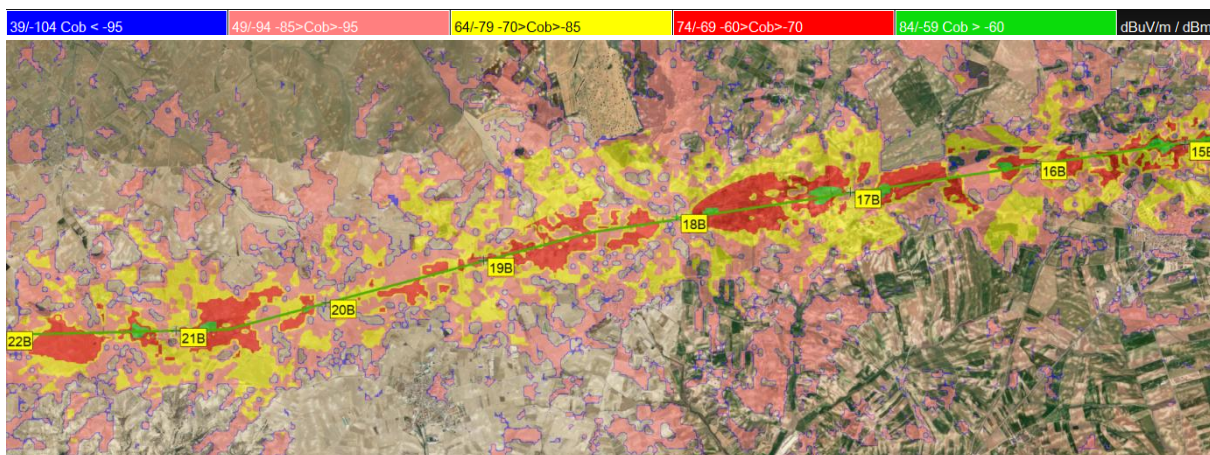


Figura 30. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (3)

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

En este tramo, se aprecia una cobertura muy favorable. La mayoría del recorrido mantiene niveles de señal superiores a -85 dBm, con amplias zonas donde incluso se superan los -70 dBm. Esto indica una excelente propagación de la señal y asegura una conexión estable y de alta calidad para los servicios ferroviarios. Apenas se observan interrupciones significativas en la Figura 31, lo que refuerza la fiabilidad de la red en este segmento.

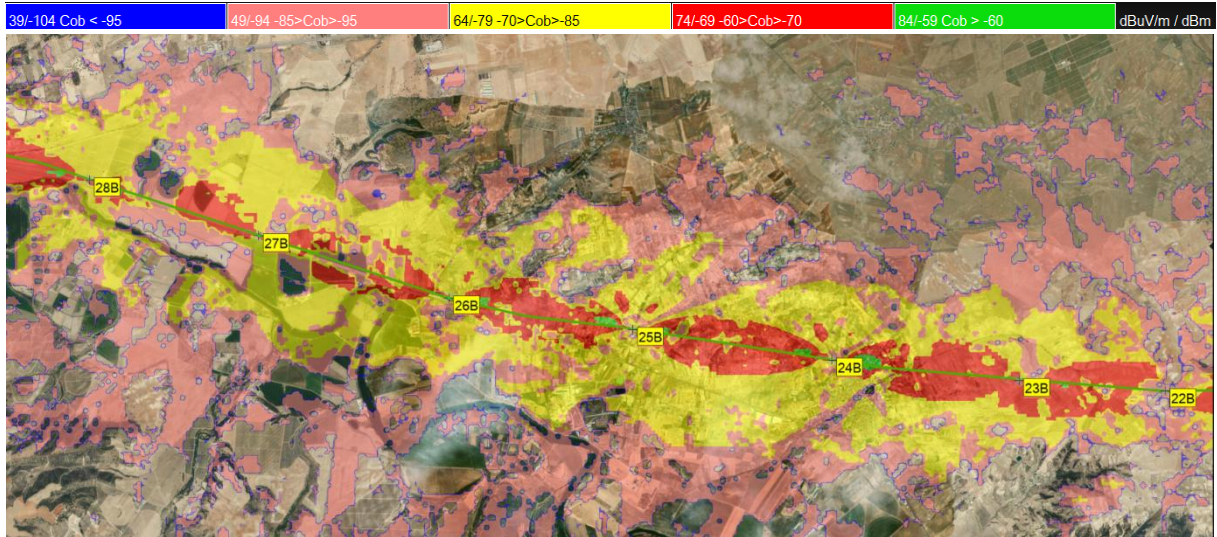


Figura 31. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (4)

Este tramo presenta una cobertura bastante sólida. La mayoría de la vía férrea se encuentra por encima del umbral estimado de -95 dBm, con varias zonas superando incluso los -85 dBm. Se observan algunos pequeños segmentos puntuales con valores inferiores en la Figura 32, especialmente a la entrada de Talavera de la Reina de nuevo, siendo una zona urbana, pero no representa una amenaza importante para la continuidad del servicio.

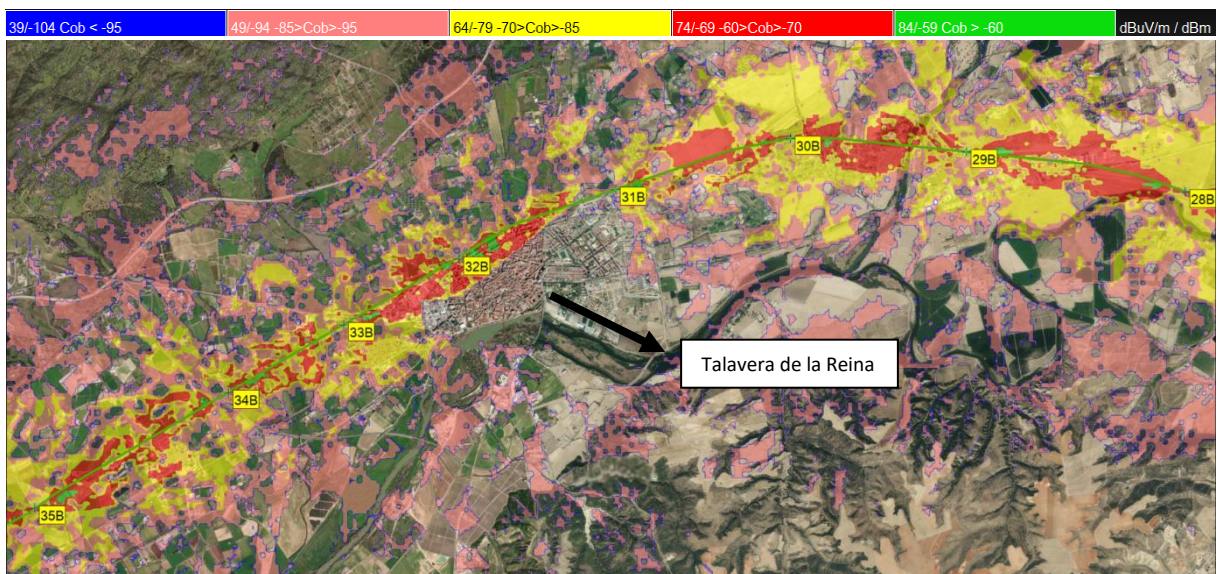


Figura 32. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (5)

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

Este segmento mostrado en la Figura 33 mantiene un rendimiento bastante bueno en términos de cobertura. La mayor parte de la vía férrea se encuentra dentro del rango aceptable por encima de -95 dBm. En zonas puntuales, especialmente próximas a relieves irregulares o vegetación espesa, se aprecia una ligera caída por debajo del umbral, pero de forma muy localizada.

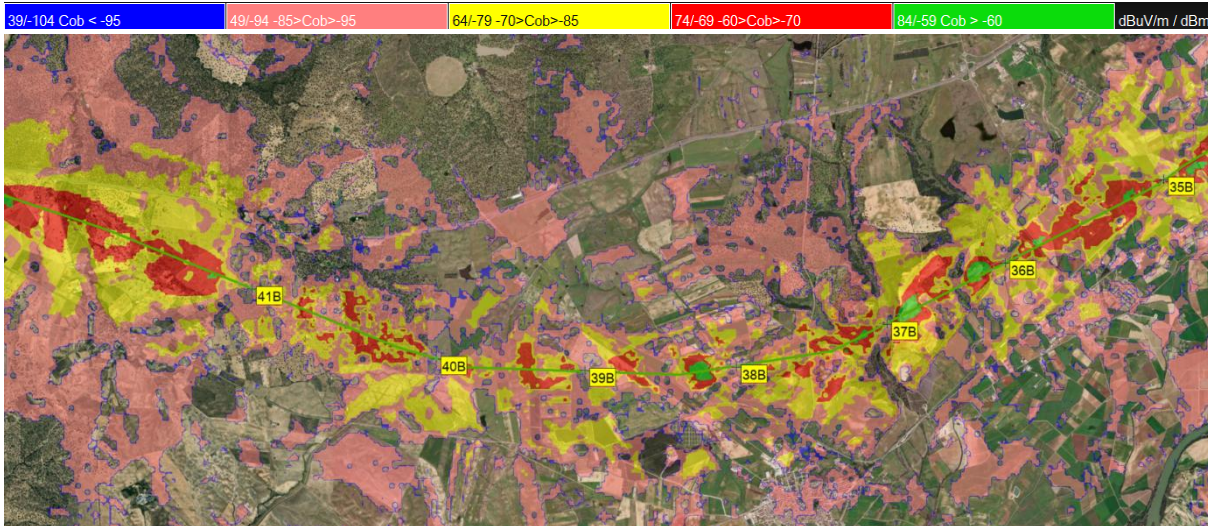


Figura 33. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (6)

Por último, las Figura 34, Figura 35y Figura 36 muestran una cobertura muy satisfactoria sobre la vía, siendo la señal especialmente homogénea sin apreciarse zonas con pérdidas, siendo durante todo este tramo la cobertura superior a -85 dBm.

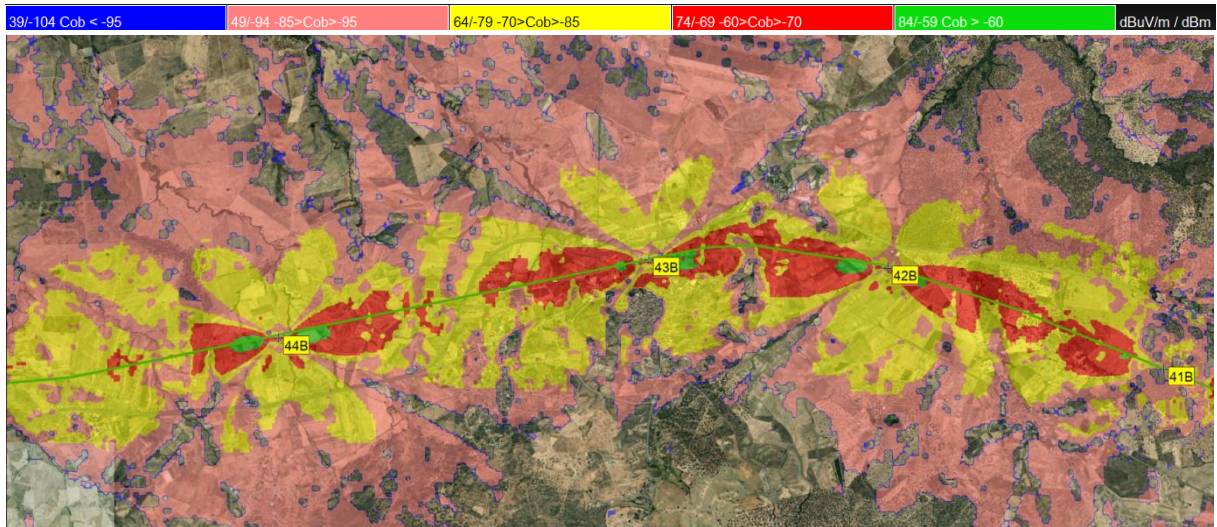


Figura 34. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (7)

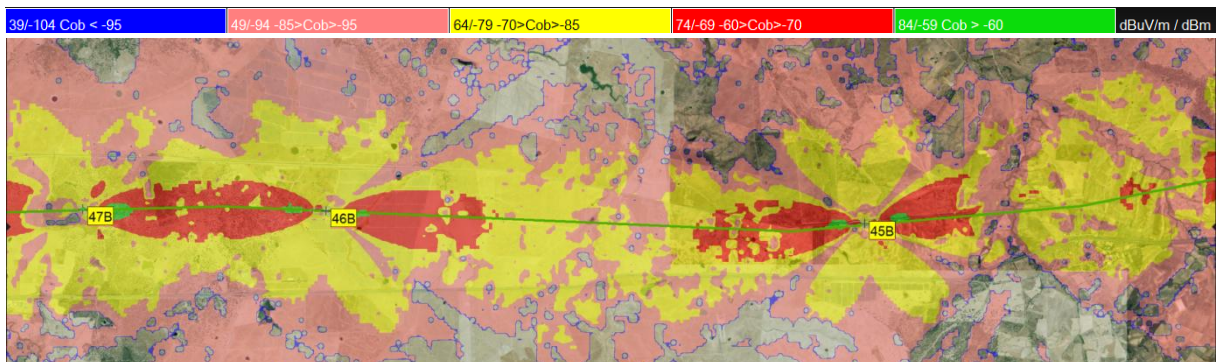


Figura 35. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (8)

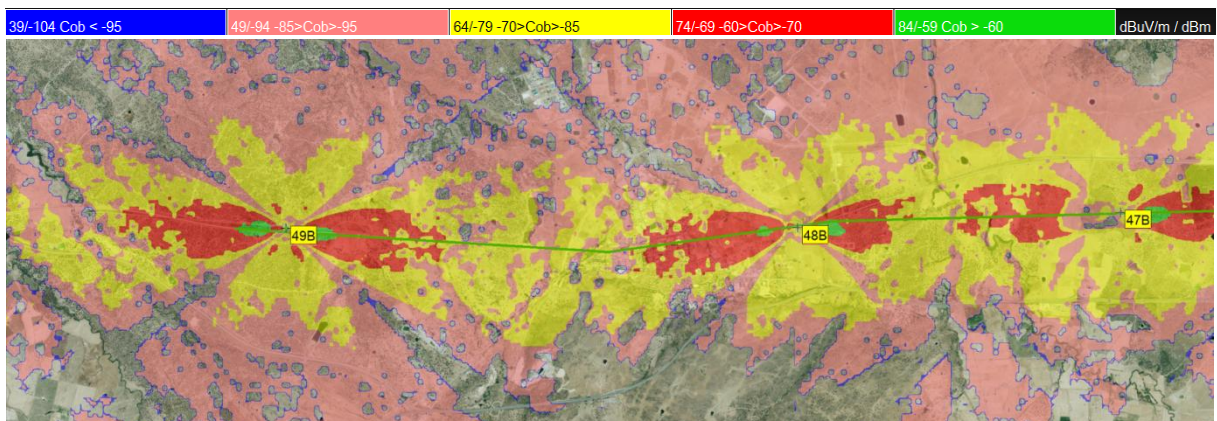


Figura 36. Cobertura Radioeléctrica TOL - TAL Capa B (9)

## 4.4 Red de Telecomunicaciones Fijas

### 4.4.1 Tendido de Fibra Óptica

El diseño de la red de fibra óptica para el tramo comprendido entre Toledo y Talayuela sigue una estructura coherente con las prácticas actuales de despliegue en líneas ferroviarias de Alta Velocidad. La canalización se ha proyectado por ambos lados de la vía, permitiendo así una distribución simétrica y redundante de los servicios de comunicaciones.

Por cada lateral de vía se han dispuesto dos cables de fibra óptica: uno de 96 fibras y otro de 32 fibras. Esta configuración permite garantizar una adecuada capacidad de transmisión y facilitar la segregación de fibras hacia los distintos elementos de la infraestructura ferroviaria. Los cables se disponen en canaletas o canalizaciones, asegurando su protección frente a factores ambientales y facilitando futuras labores de mantenimiento.

En cada ET (Edificio Técnico) se ha previsto la entrada de ambos cables (96 y 32 fibras) desde los dos lados de la vía, lo que permite un tendido de fibra dual que incrementa la fiabilidad del sistema ante posibles cortes o fallos. Esta solución favorece la continuidad de servicio y la facilidad de gestión de los recursos ópticos desde los centros de control.

Por otro lado, las estaciones base se conectan exclusivamente al cable de 96 fibras ópticas, conforme a las necesidades de ancho de banda y redundancia del sistema FRMCS. El cable de 32 fibras, en cambio, no se emplea para estas derivaciones, sino que se usa para conectar otros servicios de la red ferroviaria como puede ser señalización, vigilancia o detección. Las segregaciones hacia las BTS se realizan directamente desde el cable de 96 fibras, mediante una segregación de 32 fibras desde el cable troncal para la Capa A situado en la vía derecha y para la Capa B de la misma manera situado en la vía izquierda.

Este planteamiento permite un despliegue ordenado, robusto y escalable, en línea con los requisitos de una red de comunicaciones críticas como la que exige el sistema ferroviario de alta velocidad con tecnología FRMCS.

### 4.4.2 Red IP Fija

La red fija constituye un componente esencial para garantizar la transmisión eficiente y segura de toda la información generada en los distintos emplazamientos radioeléctricos. Esta red no solo canaliza el tráfico de voz y datos, sino que también soporta las señales de control y supervisión necesarias para el funcionamiento del sistema ferroviario, sirviendo de enlace entre la red de acceso y el núcleo central del sistema FRMCS.

La red de comunicaciones FRMCS diseñada en este proyecto se apoya en una topología en anillo de fibra óptica con doble plano (A y B), lo que garantiza redundancia y alta disponibilidad a lo largo de todo el trazado ferroviario. Este primer anillo mostrado en la Figura 37, correspondiente al primer anillo de la línea, conecta los dos primeros edificios técnicos, donde se ubican los *routers* de nivel 3, encargados de la conexión con la red troncal y la gestión del

tráfico global. En el Anexo A.4 Esquema de Red IP Fija, se muestran el resto de los anillos conectados entre los principales Edificios Técnicos o estaciones.

A lo largo del recorrido, cada emplazamiento BTS cuenta con nodos intermedios de red, entre los que se encuentran switches MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) de nivel 4 que se encargan de la gestión del tráfico y sincronización del emplazamiento FRMCS y nodos industriales N4-L2 responsables de gestionar alarmas y funciones auxiliares. Cada plano de red (A y B) opera de forma independiente, con rutas físicas diferenciadas mediante enlaces de fibra óptica que transcurren por vía 1 y vía 2, representados por distintos colores en el esquema.

En zonas críticas como los túneles, se han previsto cabezas remotas conectadas a la red mediante enlaces ópticos dedicados, gestionadas por nodos industriales de nivel N4-L2, especialmente adaptados para condiciones adversas. Esta arquitectura permite que, ante una caída de enlace, el sistema siga operativo gracias a la redundancia de caminos, asegurando la continuidad del servicio en una línea donde circularán trenes a velocidades superiores a 300 km/h.

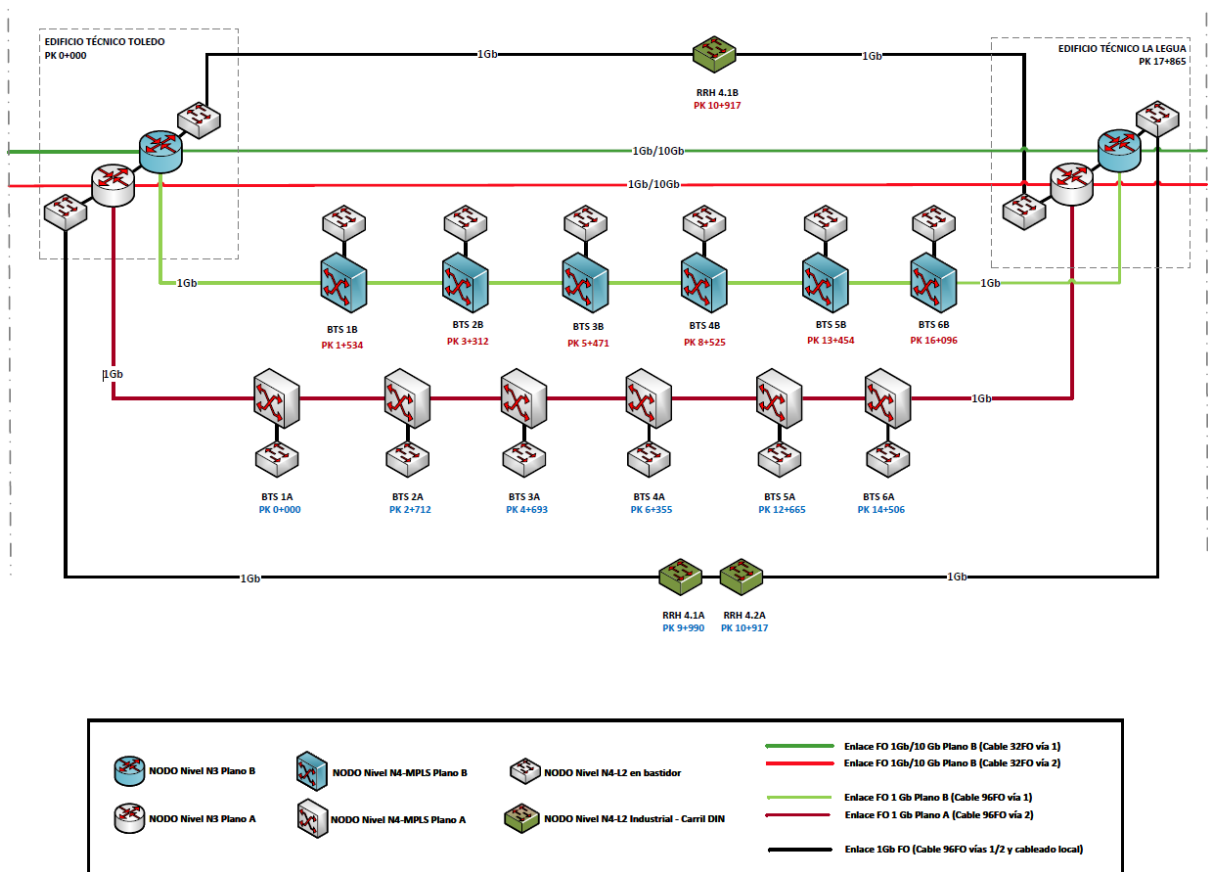


Figura 37. Esquema de la arquitectura de red fija FRMCS con topología en anillo redundante y doble plano

## **4.5 Suministro de Energía**

El sistema de alimentación eléctrica asociado al despliegue de la infraestructura FRMCS en el tramo Toledo–Talayuela ha sido diseñado para garantizar un suministro continuo, seguro y distribuido a lo largo de todo el trazado ferroviario.

La solución implementada se basa en dos líneas trifásicas de 750 V con cableado de 3x50 mm<sup>2</sup> de aluminio, que recorre longitudinalmente el trazado, por ambos lados de vía. Estas líneas actúan como eje de distribución eléctrica a lo largo del corredor ferroviario, desde la que se realizan derivaciones hacia cada uno de los centros de transformación (CT), ubicados estratégicamente cerca de los emplazamientos FRMCS.

Desde estos centros de transformación, se deriva una alimentación en baja tensión mediante cables de 230 V, con secciones de 2x16 mm<sup>2</sup> o 2x25 mm<sup>2</sup> de aluminio, en función de las necesidades de consumo de los equipos conectados. Estos cables alimentan principalmente las RRH y BTS, respectivamente, a través de canalizaciones protegidas, asegurando así tanto la seguridad del tendido como su accesibilidad para labores de mantenimiento.

Cada Estación Base y unidades radio remotas cuenta además con su propio centro de transformación de 5 kVA, que permite adaptar la tensión trifásica de la línea principal a los valores adecuados para la operación de los equipos de telecomunicaciones. Esta disposición garantiza autonomía energética en caso de incidencias en otros tramos y facilita el aislamiento de fallos. Adicionalmente, estos emplazamientos disponen de una segunda acometida eléctrica que proviene de la catenaria.

El diseño busca lograr un equilibrio entre eficiencia energética, redundancia y facilidad de operación, permitiendo una alimentación estable y controlada para todos los elementos de la red FRMCS, cumpliendo así con los estándares requeridos para infraestructuras críticas de alta disponibilidad como lo es en este entorno ferroviario.

## 5. RESULTADOS

La simulación de cobertura realizada con el software HTZ sobre la línea de Alta Velocidad Toledo - Talayuela demuestra que el diseño propuesto de la red FRMCS cumple ampliamente con los objetivos de cobertura en ambas capas de servicio. Cada capa se ha modelado con estaciones base dispuestas a lo largo del trazado para proporcionar cobertura continua y redundante. Los mapas de cobertura generados para la Capa A y la Capa B muestran niveles de señal robustos a lo largo de la línea, con una superposición suficiente entre celdas adyacentes para asegurar *handover* sin interrupciones. En términos generales, la arquitectura de red diseñada con doble capa (A y B) permite que ambas se comporten de forma equivalente y complementaria, sin establecerse una jerarquía fija entre ellas. Esta estrategia no solo incrementa la robustez de la red frente a zonas de sombra o degradación puntual de señal, sino que también aporta redundancia operativa, ya que en caso de fallo o mantenimiento de una estación base en una capa, la otra puede mantener el servicio. Esta solución de doble capa está alineada con los requisitos de fiabilidad definidos para comunicaciones ferroviarias de misión crítica.

En términos cuantitativos, los resultados de la simulación indican un alto porcentaje de cobertura dentro de los niveles requeridos por las especificaciones técnicas. En concreto, se pueden destacar los siguientes indicadores de desempeño del diseño:

- **Cobertura según criterio ADIF:** Aproximadamente 98% del recorrido simulado presenta una señal de al menos -85 dBm en condiciones de campo abierto, cumpliendo así con el umbral mínimo establecido por ADIF para cobertura ferroviaria en espacio abierto. Este resultado significa que prácticamente la totalidad del trazado al aire libre mantiene un nivel de señal igual o superior al requerido, con márgenes de seguridad en muchas zonas del tramo.
- **Cobertura según especificación EIRENE:** El diseño satisface las exigencias del estándar EIRENE, que establece como criterio general una cobertura superior al 95% del tiempo o del área, con niveles de recepción ajustados a la velocidad de circulación. Para velocidades de hasta 220 km/h, se requiere una potencia mínima de -95 dBm, valor que se ha alcanzado holgadamente en la simulación, manteniéndose por encima de ese umbral en prácticamente todo el trazado. En los tramos de muy alta velocidad (por encima de 220 - 250 km/h), donde las recomendaciones internacionales elevan el umbral a -92 dBm, el diseño también cumple: la cobertura con niveles iguales o superiores a -92 dBm se mantiene en torno al 95% del trayecto, respetando los márgenes de fiabilidad exigidos para líneas de alta velocidad.

Estos resultados confirman que tanto la Capa A como la Capa B, operando de forma complementaria, aseguran una cobertura radio óptima en más del 95% del trazado en todos los escenarios previstos. La potencia de señal simulada a lo largo de la vía férrea se mantiene dentro de los parámetros requeridos no solo en campo abierto, sino también en entornos complejos. Por ejemplo, se comprueba que en tramos de orografía complicada (como cortes, desmontes o zonas boscosas) el diseño de antenas direccionales y la planificación de sitios

garantizan niveles de recepción por encima del umbral de -85 dBm. Del mismo modo, en los accesos a túneles o trincheras, la simulación refleja que la señal decae gradualmente, pero permanece dentro de rangos aceptables, gracias a la colocación estratégica de emisores en bocas de túnel y el solapamiento de cobertura entre celdas adyacentes. En los tramos simulados dentro de túneles, se ha supuesto el uso de sistemas radiantes o antenas especiales; aunque HTZ modela estos tramos de forma idealizada, el diseño cumple con la expectativa de proporcionar al menos los niveles mínimos de señal recomendados dentro de estas estructuras (en redes ferroviarias suele procurarse  $\geq -95$  dBm en la cabina, e incluso -70 dBm en el receptor del tren dentro de túneles largos para máxima fiabilidad).

Cabe señalar que la única incidencia significativa identificada en la simulación corresponde al núcleo urbano de Talavera de la Reina, una localidad intermedia en el trazado. En esta zona, la presencia de un entorno urbano denso (edificaciones, obstáculos y posible interferencia del entorno) provoca una ligera degradación de la cobertura en comparación con los tramos a campo abierto. En concreto, el análisis de niveles de señal muestra que, aunque la mayoría del entorno urbano mantiene valores dentro de los umbrales establecidos, se detectan algunas zonas de sombra donde la potencia recibida podría descender por debajo de los -85 dBm debido al efecto de sombreado y a la reflexión múltiple en el entorno construido.

No obstante, esta situación no implica la necesidad de incorporar nuevos elementos como repetidores o microceldas, sino que puede ser resuelta mediante ajustes en los emplazamientos ya planificados en las proximidades de Talavera. La reorientación de antenas, el ajuste de tilt, la modificación de alturas o incluso la reubicación de alguno de los emplazamientos aledaños permitiría optimizar la cobertura en la zona conflictiva, manteniendo la solución dentro del alcance previsto por este proyecto. Esta estrategia se alinea con la filosofía del diseño realizado, que plantea una red FRMCS robusta y adaptable, capaz de alcanzar los objetivos de cobertura sin necesidad de ampliaciones estructurales no contempladas en la planificación inicial.

Fuera de este caso puntual, no se han detectado deficiencias relevantes en la simulación. El diseño propuesto cumple con las especificaciones de ADIF y EIRENE en más del 95% del trazado, incluyendo zonas rurales, áreas de alta velocidad y accesos a núcleos urbanos, lo que valida la solidez y viabilidad del despliegue planteado. Adicionalmente, como parte del diseño global, se ha planificado también la instalación de una red de comunicaciones fijas, compuesta por cableado de fibra óptica y una red de transmisión, así como una red de energía que garantice el suministro eléctrico necesario para el funcionamiento continuo de todos los emplazamientos.

## 6. PRESUPUESTO

En este capítulo se realiza una estimación de los costes vinculados a la redacción y ejecución del proyecto. Como punto de partida, la Tabla 12 recoge el coste aproximado de los profesionales involucrados en el desarrollo de este proyecto.

Tabla 12. Presupuesto del personal del proyecto

Categoría	Descripción	Importe (€/h)	Número de horas	Total (€)
Alumno	Ingeniero Junior	25	322	8.050
Director	Ingeniero superior con más de cinco años de experiencia	40	80	3.200
<b>TOTAL:</b>				<b>11.250</b>

Por otro lado, en la Tabla 13 se presenta el desglose del coste estimado correspondiente a los recursos materiales y licencias, incluyendo tanto el uso del equipo informático como del software empleado para la realización de la simulación

Tabla 13. Presupuesto de licencia y material para la elaboración del proyecto

Categoría	Concepto	Importe	Uso (meses)	Amortización (años)	Total (€)
Recurso Material	Ordenador Personal	1.200	7	5	140
Licencia	HTZ	7.000	4	2	1.170
<b>TOTAL:</b>					<b>1.310</b>

En la Tabla 14 se presenta el desglose del Presupuesto de Ejecución Material (PEM) correspondiente al proyecto, organizado por capítulos y subcapítulos. Esta estructura permite identificar de forma detallada los distintos elementos que componen la inversión, así como los importes asociados a cada uno de ellos. La clasificación responde a criterios técnicos y funcionales, lo que facilita la interpretación y el análisis económico del conjunto del proyecto.

Tabla 14. Presupuesto del proyecto

Categoría	Descripción	Importe (€)	Total (€)
Obra Civil	Canalizaciones y arquetas	761.241,40	<b>9.306.785,27</b>
	Torres y mástiles	3.991.845,97	
	Acondicionamiento	2.664.730,25	
	Casetas	1.863.891,45	
	Armarios	25.076,20	
Cables	Cables de Fibra Óptica	2.382.700,00	<b>2.951.607,18</b>
	Cables de Energía	79.816,00	
	Otros	489.091,18	
Sistemas de Telecomunicaciones Fijas	Redes de Datos	1.469.361,67	<b>1.469.361,67</b>
Sistemas de Telecomunicaciones Móviles	Sistema Radio	3.494.938,37	<b>4.479.007,70</b>
	Guía ondas y Elementos Asociados	502.357,87	
	Antenas	256.068,25	
	Equipamiento Subsistema Red	225.643,21	
Sistemas Auxiliares	Energía	2.534.100,10	<b>2.559.661,82</b>
	Seguridad y Alarmas	25.561,72	
Ingeniería, pruebas y puesta en servicio	Mediciones, pruebas y carga de datos	443.925,00	<b>443.925,00</b>
Documentación	Inventario y as-built	195.854,40	<b>195.854,40</b>
Formación	Curso básico FRMCS y energía	11.463,77	<b>11.463,77</b>
Seguridad y Salud	Prevención de RRLL	620.000,00	<b>620.000,00</b>
Actuaciones Medioambientales	Gestión de residuos y estudio de impacto medioambiental	512.000,00	<b>512.000,00</b>
<b>TOTAL:</b>			<b>22.549.666,81</b>

A continuación, en la Figura 38, se representa gráficamente la distribución del Presupuesto de Ejecución Material (PEM), lo que permite visualizar de manera intuitiva el peso relativo de cada categoría en el conjunto del proyecto. Esta representación facilita la identificación de las partidas más relevantes y aporta una perspectiva global sobre el reparto económico de los recursos.

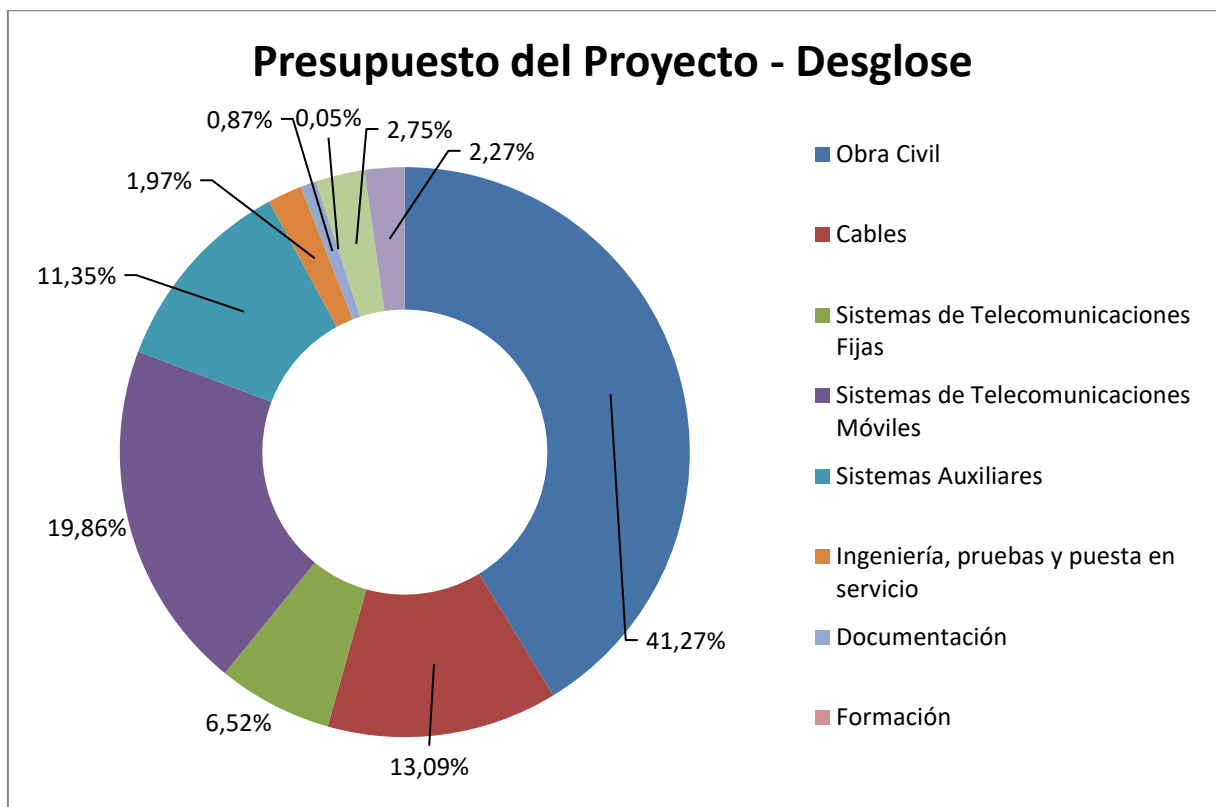


Figura 38. Desglose del presupuesto

El presupuesto total del proyecto será la suma de los totales de la Tabla 12, la Tabla 13 y Tabla 14, además del beneficio industrial, gastos generales e IVA. Este sumatorio queda especificado en la siguiente tabla.2868966.22

Tabla 15. Presupuesto total del proyecto

Descripción	Precio (€)
Coste de realización del proyecto	22.549.666,81
Coste del personal del proyecto	11.250,00
Coste de licencia y material	1.310,00
Beneficio Industrial (6%) y Gasto General (9%)	3.382.450,02
Total licitación sin IVA	25.944.676,83
IVA (21%)	5.448.382,13
<b>Total licitación con IVA</b>	<b>31.393.058,96</b>

## 7. IMPACTO DEL PROYECTO

El desarrollo e implantación del sistema FRMCS en la línea de Alta Velocidad entre Toledo y Talayuela no solo tiene implicaciones técnicas, sino que también genera un impacto notable en distintos ámbitos, contribuyendo de forma significativa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como pueden apreciarse en la Figura 39. A continuación, se analizan los principales tipos de impacto generados por el proyecto.

- **Impacto social:** La implementación de una red avanzada de comunicaciones móviles mejora la calidad del servicio ferroviario al ofrecer mayor seguridad, estabilidad y puntualidad, además de favorecer la interoperabilidad y el acceso a servicios digitales. Esto promueve una movilidad más inclusiva y cohesionada territorialmente.
- **Impacto ético:** El proyecto se basa en tecnologías sostenibles, abiertas y alineadas con principios de equidad e inclusión. La interoperabilidad y el uso de estándares internacionales garantizan un desarrollo colaborativo y justo, favoreciendo la seguridad y protección de los usuarios mediante la red FRMCS.
- **Impacto medioambiental:** La modernización del sistema de telecomunicaciones impulsa el uso del ferrocarril como alternativa más ecológica, contribuyendo a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y del consumo energético. Aunque la instalación de infraestructuras implica cierto impacto, este ha sido minimizado mediante una planificación responsable.
- **Impacto económico:** La inversión en FRMCS se traduce en eficiencia operativa, reducción de costes y aumento de la capacidad ferroviaria. Además, impulsa servicios como el mantenimiento predictivo y mejora la competitividad del tren, generando ingresos y empleo cualificado en el sector.



Figura 39. Impacto del proyecto y aportación a los ODS

## 8. CONCLUSIONES

### 8.1 Conclusiones

Tras la realización del análisis y diseño de la red FRMCS para la línea de Alta Velocidad Toledo - Talayuela se ha logrado satisfacer plenamente los requisitos de cobertura estipulados por los estándares ferroviarios. La simulación efectuada con HTZ muestra que el sistema diseñado proporciona niveles de señal adecuados en la práctica totalidad del recorrido, cumpliendo con un >95% de cobertura confiable según los criterios EIRENE. Esto significa que, en más del 95% del tiempo y del espacio a lo largo de la vía, las comunicaciones móviles ferroviarias mantienen la potencia mínima necesaria para operaciones seguras y eficientes. El diseño, por tanto, alcanza un desempeño sobresaliente: no solo se ajusta a los umbrales de -85 dBm en campo abierto fijados por ADIF, sino que los supera con margen en la mayoría del trazado, garantizando una sólida calidad de servicio incluso en condiciones exigentes (alta velocidad, entornos abiertos y enclavamientos complejos). Este cumplimiento holgado de las especificaciones brinda confianza en la fiabilidad de las comunicaciones a lo largo de toda la línea, aspecto crítico para la futura implantación de sistemas de control de trenes de nivel 2/3 soportados sobre la red FRMCS.

Además, el proyecto pone de manifiesto la validez de la metodología de diseño empleada, que ha resultado eficaz para cubrir un corredor de Alta Velocidad concreto mediante estrategias como la cobertura en doble capa, la distribución optimizada de estaciones base y un dimensionamiento radioeléctrico riguroso. Este enfoque no solo ha sido adecuado para el entorno planteado, sino que también resulta escalable y adaptable a otros escenarios ferroviarios que adopten FRMCS, permitiendo su aplicación en líneas con distintas condiciones orográficas, densidad urbana o requisitos operativos.

Paralelamente al diseño radioeléctrico, se ha contemplado la planificación de una red de comunicaciones fijas que actúa como soporte esencial para la infraestructura móvil. Esta red incluye un doble tendido de fibra óptica en configuración de anillo, distribuido por ambas vías, con el objetivo de garantizar redundancia física y alta disponibilidad en caso de cortes o fallos en uno de los ramales. Sobre esta red de transporte óptico se ha proyectado la instalación de switches de transmisión de nivel 3 y 4, encargados de encaminar el tráfico IP, gestionar las alarmas, sincronización y comunicaciones auxiliares entre todos los emplazamientos, incluyendo los edificios técnicos principales y las cabezas remotas ubicadas en túneles.

Complementando esta infraestructura, se ha diseñado una red de suministro energético dedicada, que asegura la alimentación eléctrica estable y continua en todos los puntos de la red. Esta red considera tanto la disponibilidad de la infraestructura eléctrica en cada emplazamiento como las protecciones necesarias para condiciones ferroviarias. La combinación de esta red fija, la red eléctrica y el sistema de cobertura radioeléctrico permite configurar una solución integral, preparada para ser desplegada en entornos reales bajo los estándares de fiabilidad y continuidad que exige un sistema de telecomunicaciones de misión crítica como FRMCS.

## 8.2 Trabajos Futuros

En futuras implementaciones sobre otros trayectos, bastará con ajustar la planificación a las particularidades de cada línea, por ejemplo, la morfología del terreno, la presencia de núcleos urbanos en las proximidades de la vía, la longitud y cantidad de túneles o viaductos, y las velocidades máximas de operación. El enfoque seguido en este proyecto puede servir de modelo para abordar esas variaciones: la utilización de ambas capas, solapamiento suficiente entre celdas contiguas y refuerzos específicos (como cable radiante en túneles largos, o microceldas en estaciones céntricas) se puede ajustar en función de las necesidades locales de cada nuevo trazado. De este modo, el diseño FRMCS aquí desarrollado es escalable y aplicable a otras líneas ferroviarias, ya sean nuevas líneas de alta velocidad o corredores ya existentes que evolucionen sus comunicaciones móviles.

Finalmente, conviene destacar la viabilidad de implementar esta red FRMCS en la banda de 900 MHz, lo que aportaría ventajas significativas de coexistencia con la infraestructura actual. Dado que la red GSM-R opera en el entorno de los 900 MHz, la posibilidad de desplegar FRMCS en una banda próxima o coincidente permitiría una coexistencia armoniosa durante el periodo de transición entre tecnologías. Este enfoque facilitaría el reemplazo progresivo de GSM-R sin causar interrupciones, aprovechando emplazamientos y antenas existentes y garantizando la interoperabilidad mientras ambas redes convivan. La implementación en la banda de 900 MHz también beneficiaría a las redes convencionales, al no limitarse únicamente a las líneas de alta velocidad, FRMCS podría extenderse a líneas ferroviarias convencionales reutilizando parte del espectro, aportando las mejoras de capacidad y prestaciones de un sistema 5G, pero con un alcance radioeléctrico óptimo en entornos rurales extensos y mejor penetración en túneles, propios de las bajas frecuencias.

En síntesis, el diseño propuesto no solo es efectivo para la línea Toledo – Talayuela, sino que sienta un precedente positivo para futuras migraciones a FRMCS en el resto de la red ferroviaria. Se concluye que la solución presentada es técnicamente sólida, cumple los requisitos operacionales y es adaptable a distintos escenarios. Además, al desarrollarse como un proyecto completo que incluye tanto el diseño radioeléctrico como la red fija y energética asociada, constituye una base técnica válida sobre la cual se podría licitar y ejecutar directamente la obra de implantación de la red FRMCS en esta línea, contribuyendo así de forma efectiva al proceso de modernización del sistema ferroviario español.

## 9. REFERENCIAS

- [1] International Union of Railways (UIC), «FRMCS,» UIC, 19 Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs?recherche=FRMCS>. [Último acceso: 16 Abril 2025].
- [2] Tribunal de Cuentas Europeo, «Red ferroviaria europea de alta velocidad: no una realidad, sino un sistema fragmentado e ineficaz,» Tribunal de Cuentas Europeo, 2018. [En línea]. Available: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/high-speed-rail-19-2018/es/>. [Último acceso: 11 Febrero 2025].
- [3] J. M. M. A. y. V. R. Hernández, «Las telecomunicaciones y el ferrocarril,» Vía Libre, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Junio 2011. [En línea]. Available: [https://vialibre-ffe.com/pdf/Telecomunicaciones\\_y\\_ferrocarril\\_12062011.pdf](https://vialibre-ffe.com/pdf/Telecomunicaciones_y_ferrocarril_12062011.pdf). [Último acceso: 25 Febrero 2025].
- [4] L. G. Tassias, «Telecomunicaciones ferroviarias en las líneas de alta velocidad,» Revista BIT del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT). nº157. Páginas 34-39, Junio-Julio 2006. [En línea]. Available: <https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/luisgarciatassias.pdf>. [Último acceso: 25 Febrero 2025].
- [5] S. Réseau, «FRMCS or the Future Railway Mobile Communication System,» 15 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.sncf-reseau.com/fr/a/frmcs-or-future-railway-mobile-communication-system>. [Último acceso: 27 Febrero 2025].
- [6] I. d. I. C. Morales, «FRMCS-Transition starts laying the tracks toward a sustainable and intelligent future,» Omdia, 19 Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://omdia.tech.informa.com/-/media/tech/omdia/marketing/commissioned-research/pdfs/frmcs-transition-starts-laying-the-tracks-toward-a-sustainable-and-intelligent-future.pdf?rev=04b4137a15dc4aeab581077e97fb113b>. [Último acceso: 27 Febrero 2025].
- [7] C. Europea, «Trans-European Transport Network (TEN-T),» 2024. [En línea]. Available: [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t\\_en..](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en..) [Último acceso: 25 Febrero 2025].
- [8] EUNews, «Europe travels toward a more comprehensive and modern cross-border transport network as early as 2030,» 19 Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.eunews.it/en/2023/12/19/europe-travels-toward-a-more-comprehensive-and-modern-cross-border-transport-network-as-early-as-2030/>. [Último acceso: 25 Febrero 2025].

- [9] Geotren, «ERTMS para 'dummies',» Geotren, 19 Febrero 2025. [En línea]. Available: <https://www.geotren.es/blog/ertms-para-dummies/>. [Último acceso: 28 Febrero 2025].
- [10] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «12 hitos de la historia del ferrocarril español,» Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, [En línea]. Available: <https://www.transportes.gob.es/el-ministerio/campanas-de-publicidad/2021-anio-europeo-del-ferrocarril/conociendo-el-ferrocarril/12-hitos>. [Último acceso: 12 Febrero 2025].
- [11] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, «Ferroviario,» Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, [En línea]. Available: [https://www.transportes.gob.es/ferroviario#Organizacion\\_del\\_sector\\_ferroviario](https://www.transportes.gob.es/ferroviario#Organizacion_del_sector_ferroviario). [Último acceso: 18 Febrero 2025].
- [12] Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), «Mapa de la Red Ferroviaria Española,» ADIF, 2022. [En línea]. Available: <https://www.adifaltavelocidad.es/red-ferroviaria/mapa-de-la-red>. [Último acceso: 18 Febrero 2025].
- [13] Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), «Red de Alta Velocidad,» ADIF, [En línea]. Available: <https://www.adifaltavelocidad.es/red-ferroviaria/red-de-alta-velocidad>. [Último acceso: 18 Febrero 2025].
- [14] Asociación Ferroviaria Española (MAFEX), «MAFEX Y EL SECTOR FERROVIARIO ESPAÑOL,» 2014. [En línea]. Available: <https://magazine.mafex.es/wp-content/uploads/2015/04/2014-Mafex-y-el-Sector-Ferroviario-Espanol.pdf>. [Último acceso: 18 Febrero 2025].
- [15] Ineco, «España produce la alta velocidad más eficiente del mundo,» Ineco, 2023. [En línea]. Available: <https://www.ineco.com/ineco/comunicacion/noticias/espana-produce-la-alta-velocidad-mas-eficiente-del-mundo>. [Último acceso: 18 Febrero 2025].
- [16] International Union of Railways (UIC), «GSM-R Sistema Global de Comunicaciones Móviles - Ferrocarriles,» 18 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/gsmr>. [Último acceso: 27 Febrero 2025].
- [17] A. Rubio, «Sistema de Comunicaciones GSM-R: El Estándar Ferroviario de Comunicaciones,» BIT, nº 144, pp. 44-45, Abril 2004. [En línea]. Available: <https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/trubio.pdf>. [Último acceso: 27 Febrero 2025].

- [18] A. d. I. F. (ADIF), «Guía Técnica GSM-R,» 24 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/440380276/20190424-Guia-Tecnica-GSM-R>. [Último acceso: 28 Febrero 2025].
- [19] Data Alliance, «Bandas LTE y GSM: Asignaciones de Frecuencias,» Data Alliance, 1 Junio 2024. [En línea]. Available: <https://www.data-alliance.net/es/bandas-lte-y-gsm-asignaciones-de-frecuencias>. [Último acceso: 28 Febrero 2025].
- [20] G. Z. Muñoz, «Experiencias en la construcción de redes GSM-R en las líneas de alta velocidad de ADIF,» 2006. [En línea]. Available: <https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/gregoriozarcero.pdf>. [Último acceso: 28 Febrero 2025].
- [21] Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC), «Interferences into GSM-R due to public mobile radio networks,» uic, 23 Marzo 2011. [En línea]. Available: [https://circabc.europa.eu/sd/a/ff53dd07-3121-4b48-8724-d0aa478ec3f5/gsmr\\_interferences\\_12](https://circabc.europa.eu/sd/a/ff53dd07-3121-4b48-8724-d0aa478ec3f5/gsmr_interferences_12). [Último acceso: 2 Marzo 2025].
- [22] Instituto Nacional de Ciberseguridad (INCIBE), «Ciberseguridad aplicada a la tecnología ferroviaria,» INCIBE-CERT, 1 Agosto 2024. [En línea]. Available: <https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/ciberseguridad-aplicada-la-tecnologia-ferroviaria>. [Último acceso: 2 Marzo 2025].
- [23] Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), «Adif licita por 6,78 M€ la primera fase para las pruebas del futuro sistema europeo de telecomunicaciones ferroviarias,» ADIF, 10 Febrero 2025. [En línea]. Available: <https://www.adif.es/-/adif-licita-6-78-m%E2%82%AC-primera-fase-pruebas-futuro-sistema-europeo-telecomunicaciones-ferroviarias>. [Último acceso: 6 Marzo 2025].
- [24] Nokia, «Future Railway Mobile Communication System (FRMCS),» Nokia, [En línea]. Available: <https://www.nokia.com/industries/railways/frmcs/>. [Último acceso: 12 Marzo 2025].
- [25] Z. Jianjun, «Evolving beyond GSM-R with 5G-oriented FRMCS,» Global Railway Review, 6 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.globalrailwayreview.com/article/135340/huawei-lte-frmcs/#:~:text=The%20benefits%20of%20FRMCS%2C%20over,step%20in%20rail%E2%80%99s%20digital%20development>. [Último acceso: 18 Marzo 2025].
- [26] International Union of Railways (UIC), «FRMCS and 5G for Rail: Challenges, Achievements and Opportunities,» Diciembre 2020. [En línea]. Available: [https://uic.org/IMG/pdf/brochure\\_frmcs\\_v2\\_web.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/brochure_frmcs_v2_web.pdf). [Último acceso: 8 Marzo 2025].

- [27] 3GPP, «NR; Base Station (BS) radio transmission and reception," 3GPP TS 38.104, versión 17.13.0,» 8 Enero 2025. [En línea]. Available: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38\\_series/38.104/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.104/). [Último acceso: 6 Marzo 2025].
- [28] 3GPP, «Use of 3GPP technologies by Railways,» 3GPP, 8 Julio 2024. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/railways1>. [Último acceso: 6 Marzo 2025].
- [29] UNIFE, «Successful Transition to FRMCS – UNIFE Position Paper on the Key Success Factors for the transition to FRMCS,» 28 Septiembre 2021. [En línea]. Available: [https://www.unife.org/wp-content/uploads/2021/09/UNIFE-Postion-Paper\\_Successful-Transition-to-FRMCS\\_v28092021Final.pdf](https://www.unife.org/wp-content/uploads/2021/09/UNIFE-Postion-Paper_Successful-Transition-to-FRMCS_v28092021Final.pdf). [Último acceso: 6 Marzo 2025].
- [30] ADEA, «eltronic participa en el proyecto MORANE-2 que impulsará el futuro de las telecomunicaciones ferroviarias,» ADEA, [En línea]. Available: <https://www.directivosadea.com/noticias-socios/teltronic-impulsa-el-futuro-de-las-vias-ferroviarias#:~:text=Teltronic%20forma%20parte%20del%20proyecto,digital%20del%20ferrocarril%20en%20Europa>. [Último acceso: 21 Marzo 2025].
- [31] ZTE Corporation, «Future Railway Mobile Communication System (FRMCS),» ZTE Technologies, vol. 26, no. 5, pp. 1-50, Octubre 2024. [En línea]. Available: [https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediare/magazine/publication/tech\\_en/pdf/ZTE%20TECHNOLOGIES%20%28No.5%29%202024.pdf](https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediare/magazine/publication/tech_en/pdf/ZTE%20TECHNOLOGIES%20%28No.5%29%202024.pdf). [Último acceso: 14 Marzo 2025].
- [32] I. U. o. R. (UIC), «Description and Evaluation of Possible FRMCS Migration Variants for Existing ETCS and Cab Radio On-Board Units,» version 1.2, 14 Noviembre 2019. [En línea]. Available: [https://uic.org/IMG/pdf/description\\_and\\_evaluation\\_of\\_possible\\_frmcs\\_migration\\_variants\\_for\\_existing\\_etcs\\_and\\_cab\\_radio\\_on-board\\_units-toba\\_7515-v1.2.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/description_and_evaluation_of_possible_frmcs_migration_variants_for_existing_etcs_and_cab_radio_on-board_units-toba_7515-v1.2.pdf). [Último acceso: 14 Marzo 2025].
- [33] C. d. Grandis, «FRMCS as a key enabler for ERTMS and rail digitalisation,» Global Railway Review, 1 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.globalrailwayreview.com/article/100198/frmcs-key-enabler-ertms-rail-digitalisation/>. [Último acceso: 14 Marzo 2025].
- [34] Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), «Adif AV invertirá 20,5 M€ en el despliegue de la red 5G para la digitalización de diez terminales logísticas estratégicas,» ADIF Alta Velocidad, 2025. [En línea]. Available: <https://www.adifaltavelocidad.es/en/w/adif-av-invertir%C3%A1-20-5->

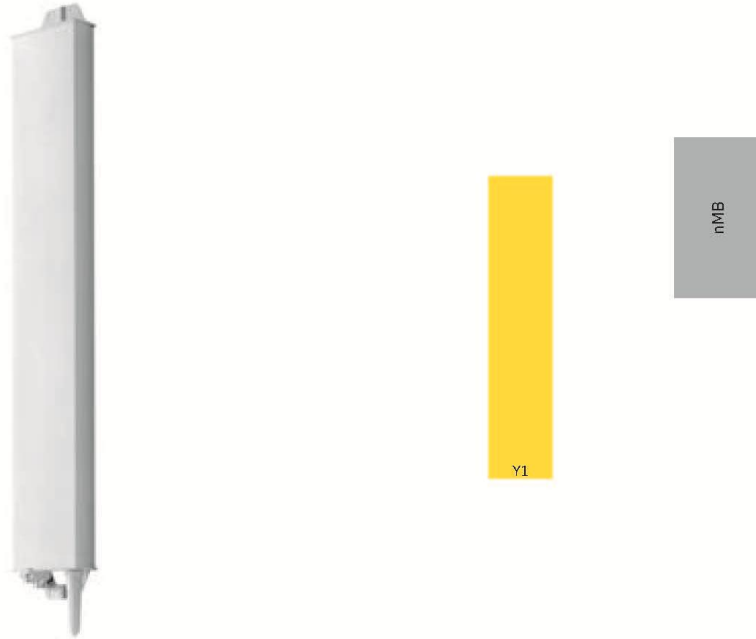
- m%E2%82%AC-en-el-despliegue-de-la-red-5g-para-la-digitalizaci%C3%B3n-de-diez-terminales-log%C3%ADsticas-estrat%C3%A9gicas. [Último acceso: 15 Marzo 2025].
- [35] Smart City Displays, «Real-Time Passenger Information System,,» Smart City Displays, [En línea]. Available: [https://smartcitydisplays.com/en/real-time-passenger-information-system\\_rtpis/](https://smartcitydisplays.com/en/real-time-passenger-information-system_rtpis/). [Último acceso: 16 Marzo 2025].
- [36] Europe's Rail Joint Undertaking, «Reshaping the TCMS landscape,» Europe's Rail, 17 Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://rail-research.europa.eu/solutions-catalogue/a-next-generation-tcms-for-a-new-generation-of-trains/>. [Último acceso: 16 Marzo 2025].
- [37] Europe's Rail Joint Undertaking, «A next generation TCMS for a new generation of trains,» Europe's Rail, Julio 2024. [En línea]. Available: <https://rail-research.europa.eu/latest-news/a-next-generation-tcms-for-a-new-generation-of-trains/>. [Último acceso: 16 Marzo 2025].
- [38] CAF, «ATO,» CAF, 2025. [En línea]. Available: <https://www.cafmobility.com/en/articles/ato/>. [Último acceso: 16 Marzo 2025].
- [39] Europe's Rail Joint Undertaking, «Increasing railway line capacity starts with increased automation,» Europe's Rail, 19 Septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://rail-research.europa.eu/latest-news/increasing-railway-line-capacity-starts-with-increased-automation/>. [Último acceso: 16 Marzo 2025].
- [40] Indra, «DaVinci: Sistema de Control y Gestión Global para Tráfico Ferroviario,» Indra, [En línea]. Available: [https://www.indracompany.com/sites/default/files/davinci\\_control\\_y\\_gestion.pdf](https://www.indracompany.com/sites/default/files/davinci_control_y_gestion.pdf). [Último acceso: 16 Marzo 2025].
- [41] Leonardo S.p.a., «CSP-MCX: The Broadband Mission Critical Communication Platform,» Leonardo, 2022. [En línea]. Available: <https://cybersecurity.leonardo.com/documents/16277703/18510681/CSP-MCX-Broadband%2BMCCplatform%2BLQ%2B%28mm09006%29.pdf?t=1655821544075>. [Último acceso: 17 Marzo 2025].
- [42] Softil, «MCX Enables Future Railway Mobile Communications,» Softil, 2023. [En línea]. Available: <https://www.softil.com/articles/mcx-an-enabler-for-frmcs/>. [Último acceso: 17 Marzo 2023].
- [43] Gobierno de España. Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial y Secretaría de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales, «LTE (4G),» Avance Digital, [En línea]. Available: <https://avance.digital.gob.es/banda-ancha/tecnologias/movil/Paginas/LTE.aspx>. [Último acceso: 17 Marzo 2025].

- [44] Revista Innovación Seguridad, «Revoluciona tu estrategia de seguridad: Descubre la solución MCPTT que garantiza comunicación instantánea y eficiente en situaciones críticas,» Revista Innovación Seguridad, 19 Junio 2024. [En línea]. Available: [https://revistainnovacion.com/nota/12342/revoluciona\\_tu\\_estrategia\\_de\\_seguridad\\_descubre\\_la\\_solucion\\_mcptt\\_que\\_garantiza\\_comunicacion\\_instantanea\\_y\\_eficiente\\_en\\_situaciones\\_criticas/](https://revistainnovacion.com/nota/12342/revoluciona_tu_estrategia_de_seguridad_descubre_la_solucion_mcptt_que_garantiza_comunicacion_instantanea_y_eficiente_en_situaciones_criticas/). [Último acceso: 17 Marzo 2025].
- [45] ETSI, «LTE; Mission Critical Video (MCVideo); Codecs and media handling,» ETSI TS 126 281 V15.0.0, Julio 2018. [En línea]. Available: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/126200\\_126299/126281/15.00.00\\_60/ts\\_126281v150000p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/126200_126299/126281/15.00.00_60/ts_126281v150000p.pdf). [Último acceso: 17 Marzo 2025].
- [46] ETSI, «LTE; Mission Critical Data (MCData) signalling control; Protocol specification (3GPP TS 24.282 version 15.2.0 Release 15,» ETSI TS 124 282 V15.2.0, Junio 2018. [En línea]. Available: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/124200\\_124299/124282/15.02.00\\_60/ts\\_124282v150200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/124200_124299/124282/15.02.00_60/ts_124282v150200p.pdf). [Último acceso: 17 Marzo 2025].
- [47] Telecommunication Engineering Centre (TEC), «Study Paper on 5G Core Network,» TEC, Version 8, 2023. [En línea]. Available: [https://www.tec.gov.in/public/pdf/Studypaper/5G%20Core%20Network\\_Study%20Paper\\_v8.pdf](https://www.tec.gov.in/public/pdf/Studypaper/5G%20Core%20Network_Study%20Paper_v8.pdf). [Último acceso: 22 Marzo 2025].
- [48] Kontron Transportation, «FRMCS White Paper: Spectrum and Migration Strategies,» Kontron Transportation, Septiembre 2023. [En línea]. Available: [https://files-eu.clickdimensions.com/snthr-akkb/files/kontron-transportation-whitepaper-20230921\\_kt\\_frmcs.pdf#:~:text=Generalizing%20the%20virtualization%20ideas%20for,or%20less](https://files-eu.clickdimensions.com/snthr-akkb/files/kontron-transportation-whitepaper-20230921_kt_frmcs.pdf#:~:text=Generalizing%20the%20virtualization%20ideas%20for,or%20less). [Último acceso: 18 Marzo 2025].
- [49] VIAVI Solutions Inc., «Pruebas de núcleos de red TeraVM,» VIAVI Solutions, [En línea]. Available: <https://www.viavisolutions.com/es-es/productos/pruebas-de-nucleos-de-red-teravm>. [Último acceso: 22 Marzo 2025].
- [50] Ericsson, «Non-standalone and Standalone: two paths to 5G,» Ericsson, Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/4/standalone-and-non-standalone-5g-nr-two-5g-tracks>. [Último acceso: 22 Marzo 2025].
- [51] S. Burrell, «¿Qué es BBU en 5G?,» Wray Castle, 19 Noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://wraycastle.com/es/blogs/glossary/what-is-bbu-in-5g-1?srltid=AfmBOoqWRR8WaoJ0IQh1KVcsC99ku-rctpnmvc6TyCqfr04OJVesXo0Z>. [Último acceso: 18 Marzo 2025].

- [52] S. Khan, «Beamforming and Massive MIMO in 5G Technology,» Telit Cinterion, 14 Enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.telit.com/blog/beamforming-massive-mimo-5g-technology/>. [Último acceso: 20 Marzo 2025].
- [53] CableFree, «Remote Radio Head, RRH for 4G & 5G,» CableFree, [En línea]. Available: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/remote-radio-head/>. [Último acceso: 20 Marzo 2025].
- [54] Electronic Communications Committee (ECC), «ECC Decision (20)02: Harmonised use of the paired frequency bands 874.4-880.0 MHz and 919.4-925.0 MHz and of the unpaired frequency band 1900-1910 MHz for Railway Mobile Radio (RMR),» ECC, 20 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://docdb.cept.org/download/4039>. [Último acceso: 20 Marzo 2025].
- [55] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT), «Las comunicaciones ferroviarias: el FRMCS desafía el futuro del transporte en España,» COIT, 24 Octubre 2024. [En línea]. Available: <https://www.coit.es/noticias/las-comunicaciones-ferroviarias-el-frmcs-desafia-el-futuro-del-transporte-en-espana>. [Último acceso: 7 Marzo 2025].
- [56] CableFree, «n40 – 5G NR Frequency Band – 2300MHz TDD,» CableFree, [En línea]. Available: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/5g-nr/5g-nr-frequency-bands/n40-5g-nr-frequency-band-2300mhz-tdd/>. [Último acceso: 21 Marzo 2025].
- [57] Ericsson, «Integrating FRMCS: Enhancing rail communications with 5G technology,» Ericsson, Noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.ericsson.com/4acd69/assets/local/reports-papers/white-papers/2024/railways-integrating-frmcs.pdf>. [Último acceso: 20 Marzo 2025].
- [58] Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), «Línea de Alta Velocidad Madrid-Extremadura-Frontera Portuguesa,» ADIF Alta Velocidad, [En línea]. Available: [https://www.adifaltavelocidad.es/l%C3%ADnea-madrid-extremadura-frontera-portuguesa/-/asset\\_publisher/86LPo67Li9pj/content/lav-madrid-extremadura-frontera-portuguesa](https://www.adifaltavelocidad.es/l%C3%ADnea-madrid-extremadura-frontera-portuguesa/-/asset_publisher/86LPo67Li9pj/content/lav-madrid-extremadura-frontera-portuguesa). [Último acceso: 8 Marzo 2025].
- [59] ATDI, «HTZ Communications,» ATDI, [En línea]. Available: <https://atdi.com/products-and-solutions/htz-communications/>. [Último acceso: 10 Marzo 2025].

## ANEXOS

### A.1 *Datasheet* de la Antena utilizada en la simulación



Antenna 1201 0L 1M 1.3m  
80010678

Capacity Compact Coverage

35° | 1695–2690 MHz | 19.5 dBi  
Electrical downtilt set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)

Midband		Y1, connector 1–2				
Frequency Range	MHz	1695 – 1880	1850 – 1990	1920 – 2170	2300 – 2400	2500 – 2690
Gain at mid Tilt	dBi	18.6	19.2	19.4	19.8	19.6
Gain over all Tilts	dBi	18.5 ± 0.4	19.1 ± 0.3	19.4 ± 0.3	19.7 ± 0.5	19.5 ± 0.9
<b>Horizontal Pattern:</b>						
Azimuth Beamwidth	°	43 ± 3.1	39 ± 1.7	38 ± 1.3	36 ± 0.7	33 ± 0.8
Front-to-Back Ratio, Total Power, ± 30°	dB	> 20	> 21	> 23	> 25	> 23
Cross Polar Discrimination at Boresight	dB	> 22	> 23	> 21	> 20	> 11
Cross Polar Discrimination over Sector	dB	> 15.0	> 16.5	> 16.5	> 13.0	> 7.5
<b>Vertical Pattern:</b>						
Elevation Beamwidth	°	7.8 ± 0.5	7.3 ± 0.2	7.1 ± 0.3	6.4 ± 0.3	5.8 ± 0.4
Electrical Downtilt continuously adjustable	°	2.0 – 10.0				
Tilt Accuracy	°	< 0.5	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
First Upper Side Lobe Suppression	dB	> 19	> 21	> 22	> 20	> 18
Upper Side Lobe Suppression, 20° Sector above Main Beam	dB	> 15	> 19	> 19	> 18	> 14
Cross Polar Isolation	dB	> 28				
Max. Effective Power per Port	W	200 (at 50 °C ambient temperature)				

Values based on NGMN-P-BASTA (version 9.6) requirements.

#### Electrical specifications, all systems

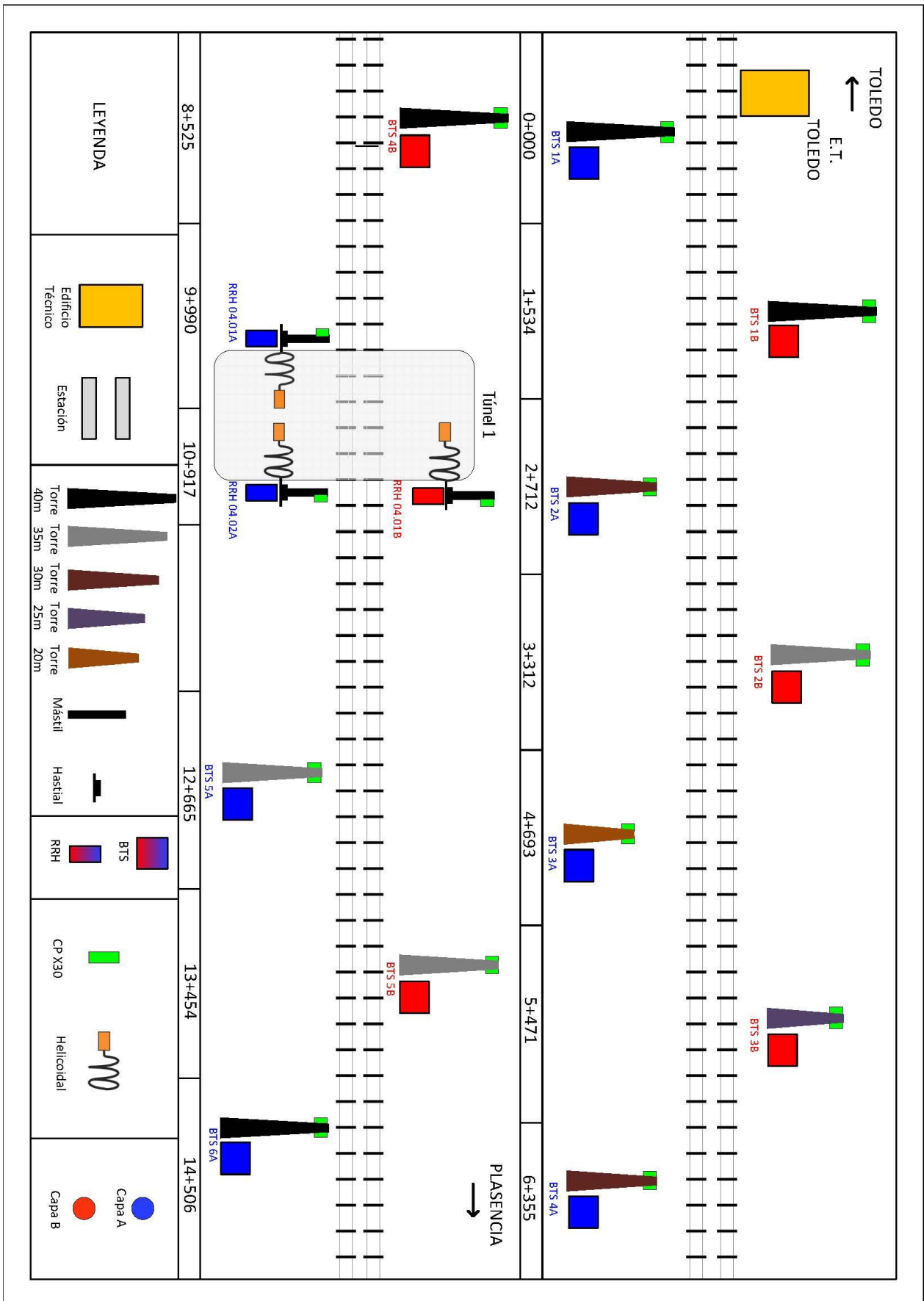
Impedance	Ω	50
VSWR		< 1.5
Return Loss	dB	> 14
Interband Isolation	dB	> 28
Passive Intermodulation	dBc	< -150 (2 x 43 dBm carrier)
Polarization	°	+45, -45
Max. Effective Power for the Antenna	W	400 (at 50 °C ambient temperature)

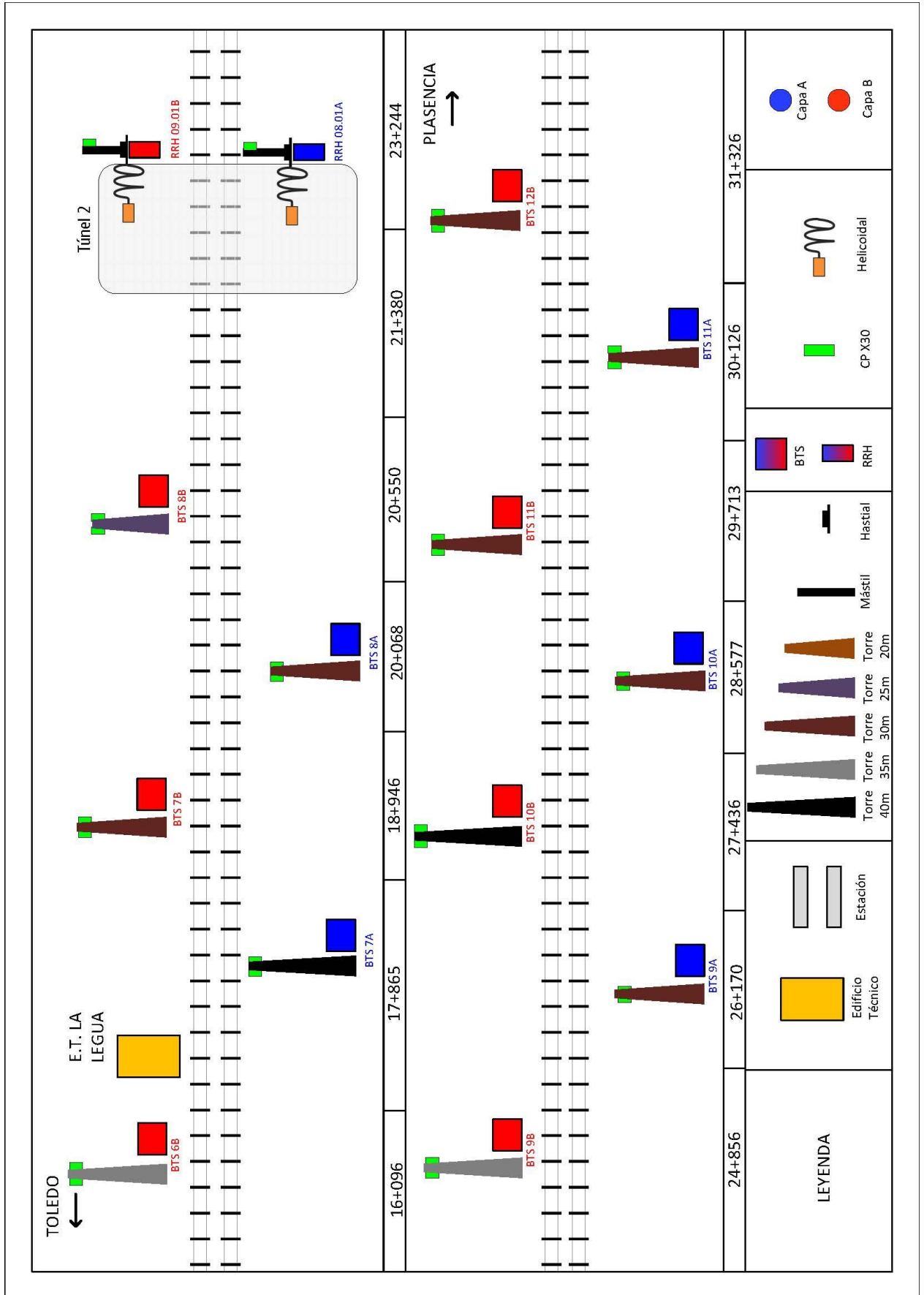
Values based on NGMN-P-BASTA (version 9.6) requirements.

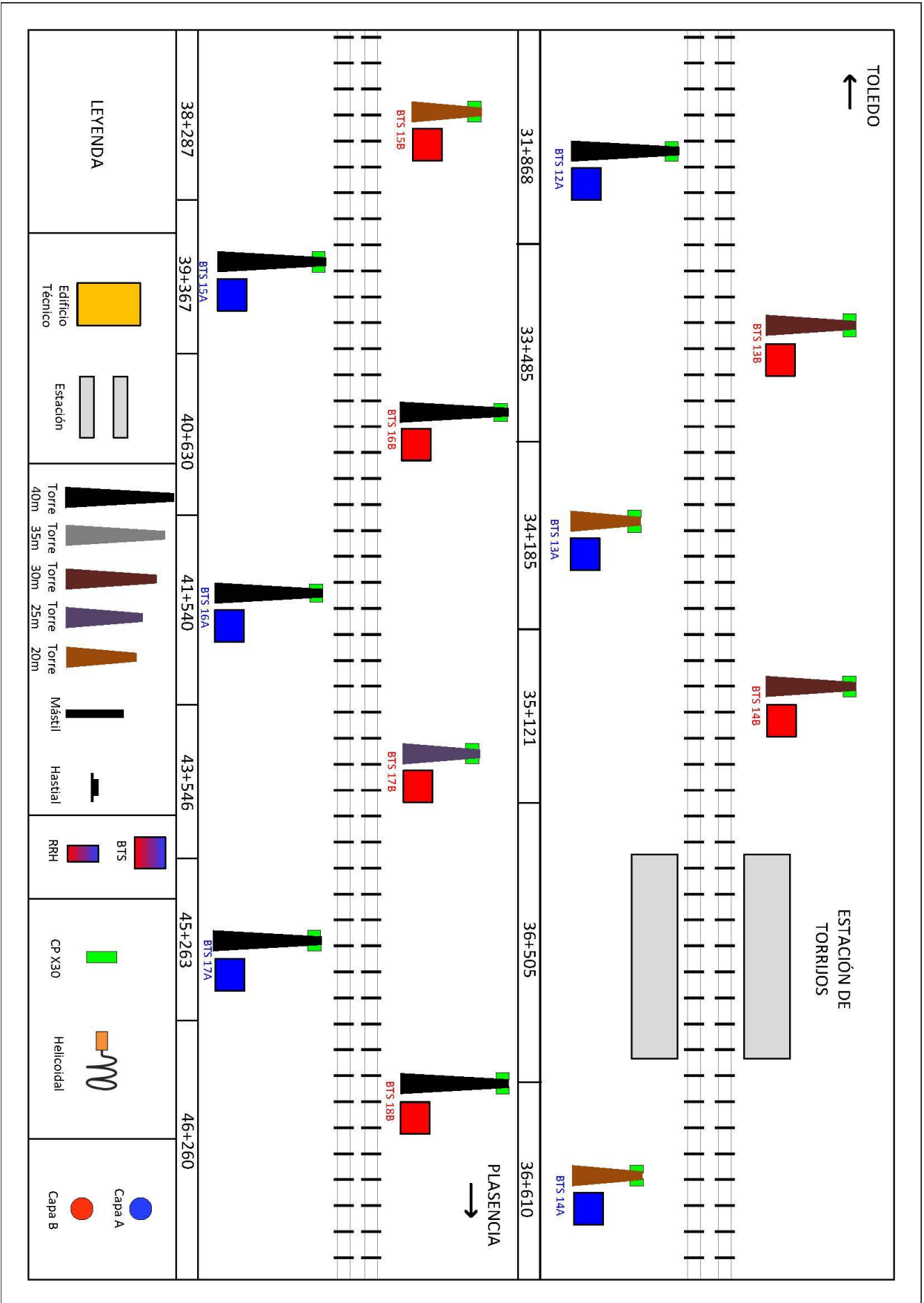
#### Mechanical specifications

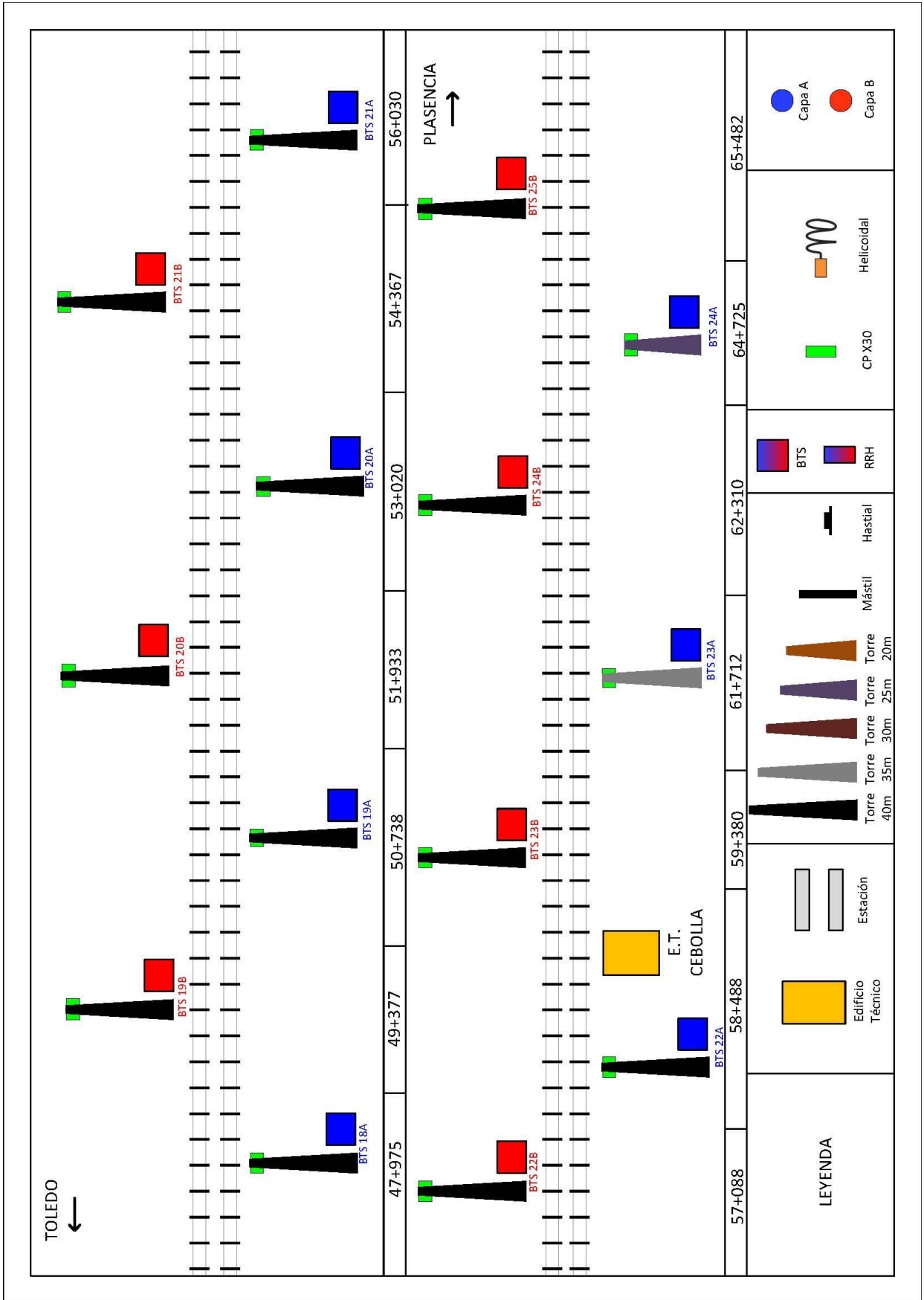
Input	2x 7-16 female	
Connector Position	bottom	
Adjustment Mechanism	1x, Position bottom continuously adjustable	
Wind load (at Rated Wind Speed: 150 km/h)	N   lbf	Frontal: 410   192 Maximal: 450   101
Max. Wind Velocity	km/h mph	200 124
Height / Width / Depth	mm inches	1272 / 235 / 69 50.1 / 9.3 / 2.7
Category of Mounting Hardware	M (Medium)	
Weight	kg lb	9.2 / 11.4 (clamps incl.) 20.3 / 25.1 (clamps incl.)
Packing Size	mm inches	1617 / 257 / 103 63.7 / 10.1 / 4.1
Scope of Supply	Panel and 2 units of clamps for 42–115 mm   1.7–4.5 inches diameter	

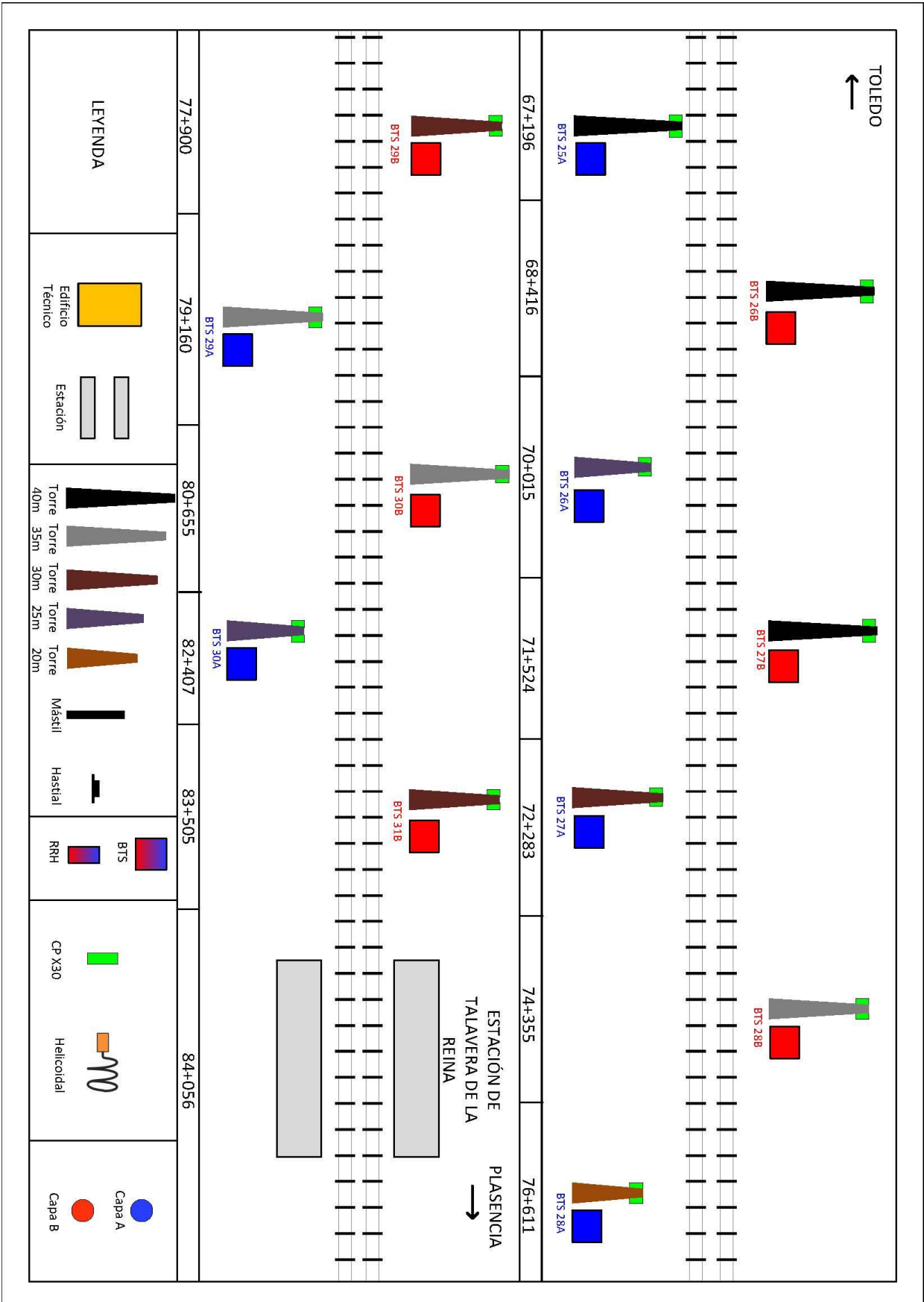
**A.2 Tira de vía. Infraestructura. Tramo Toledo – Talayuela.**

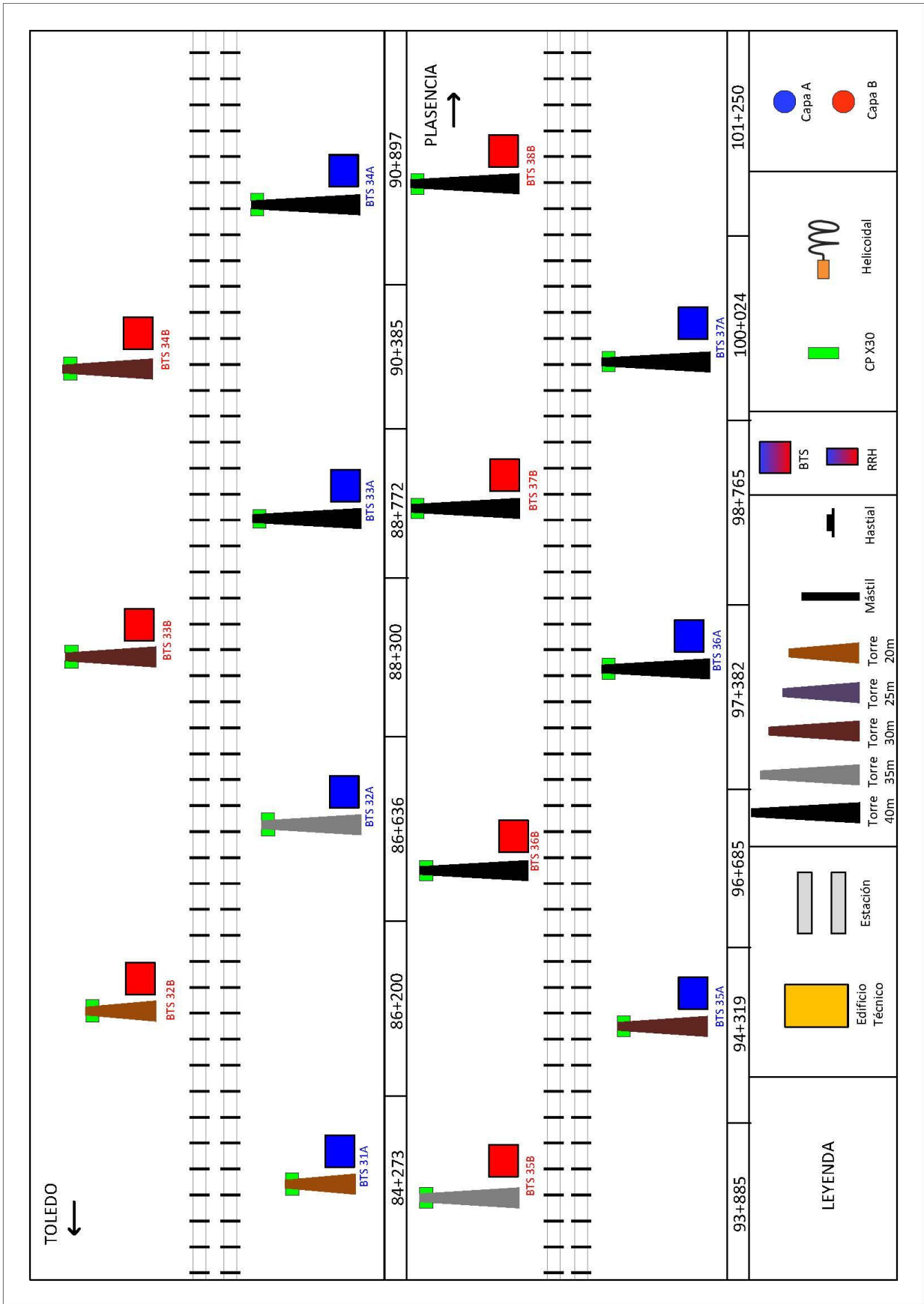


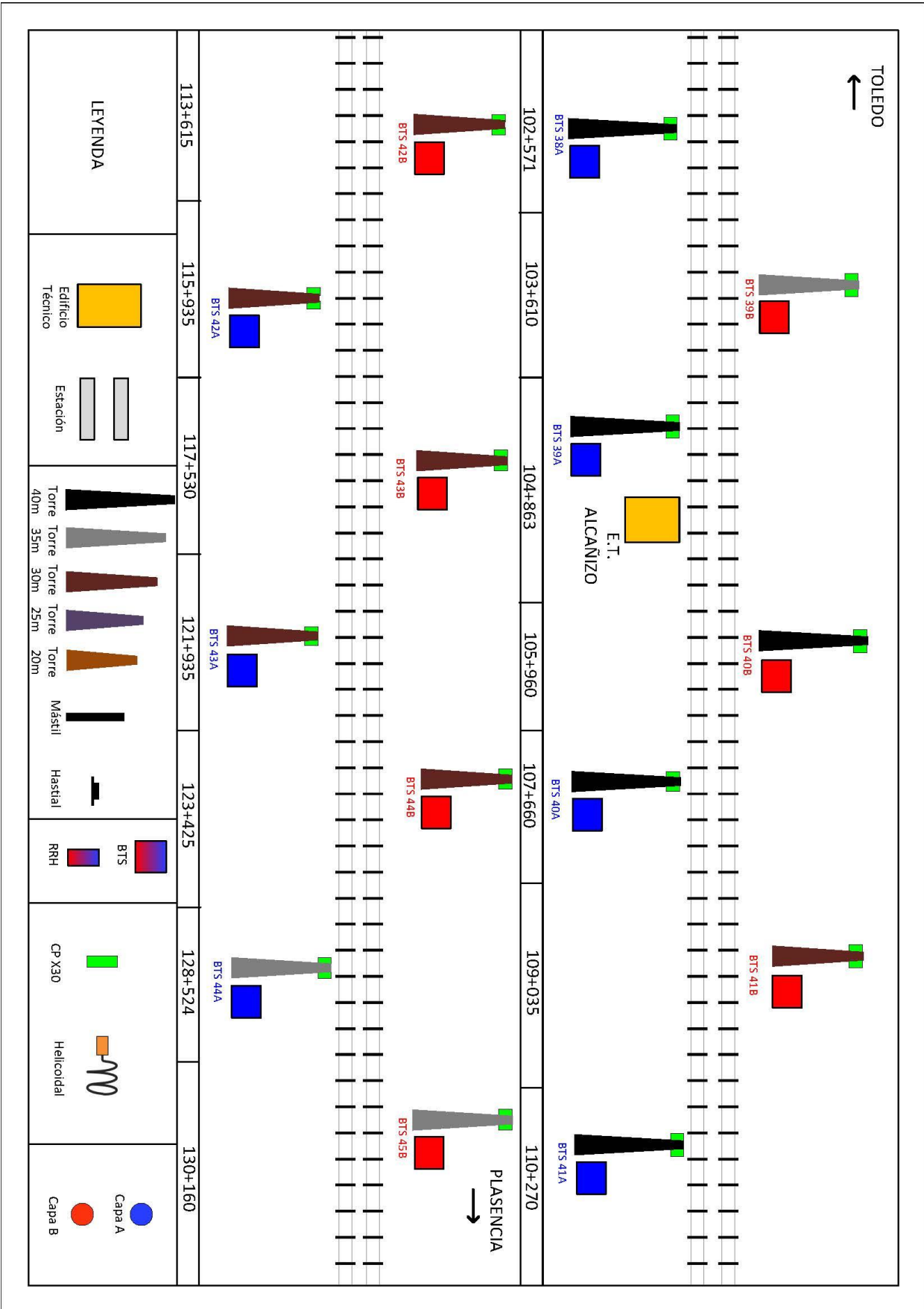


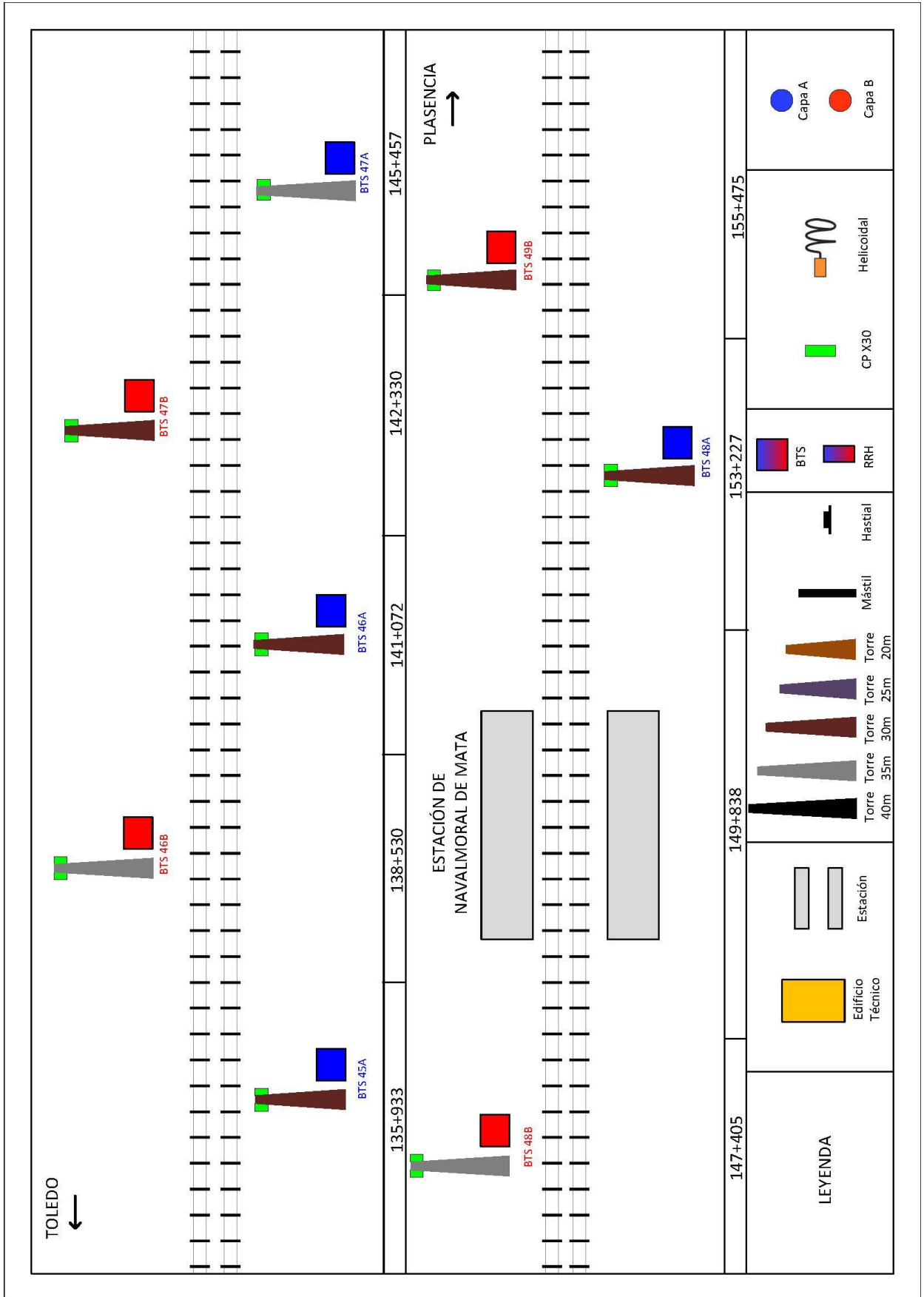




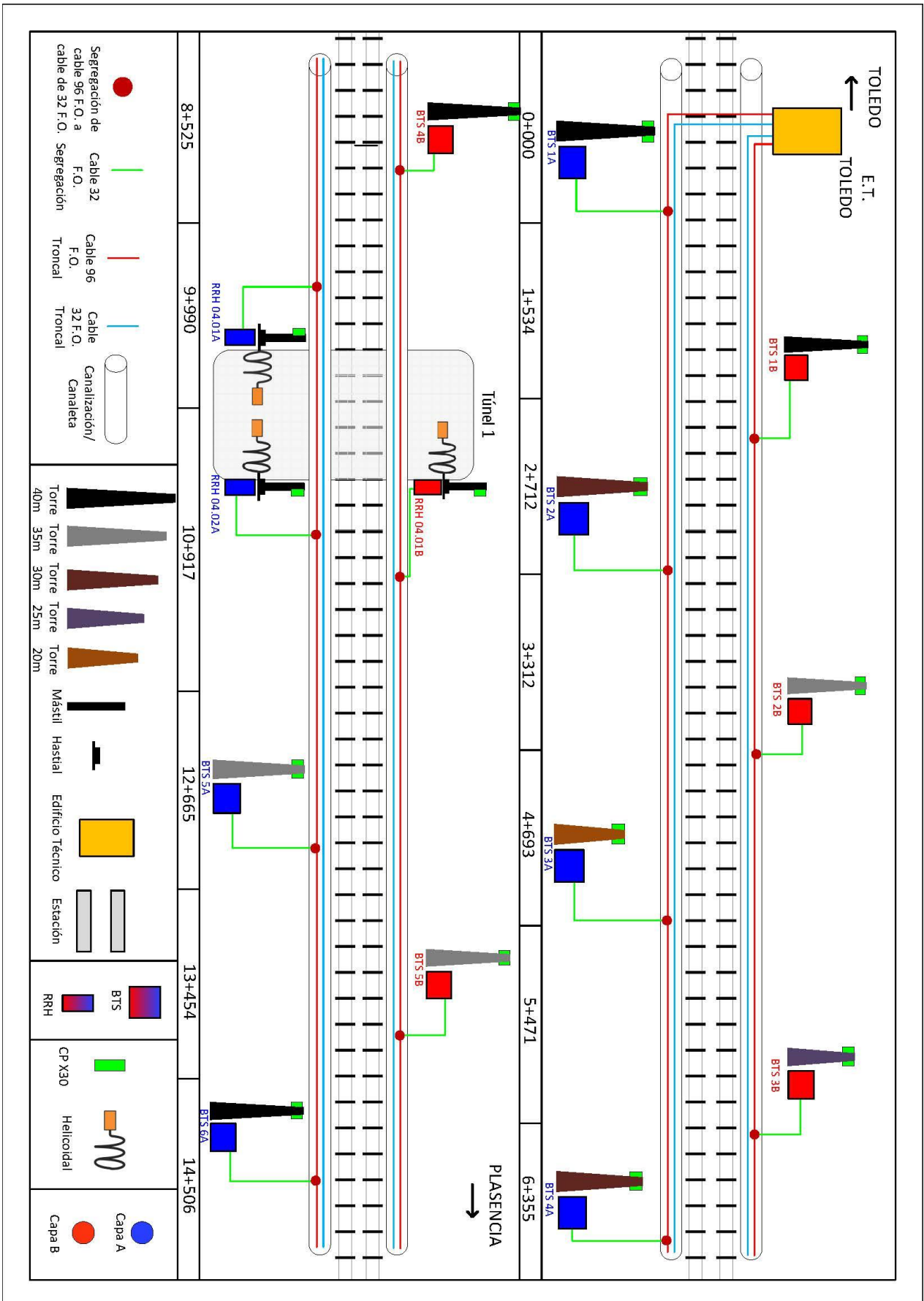


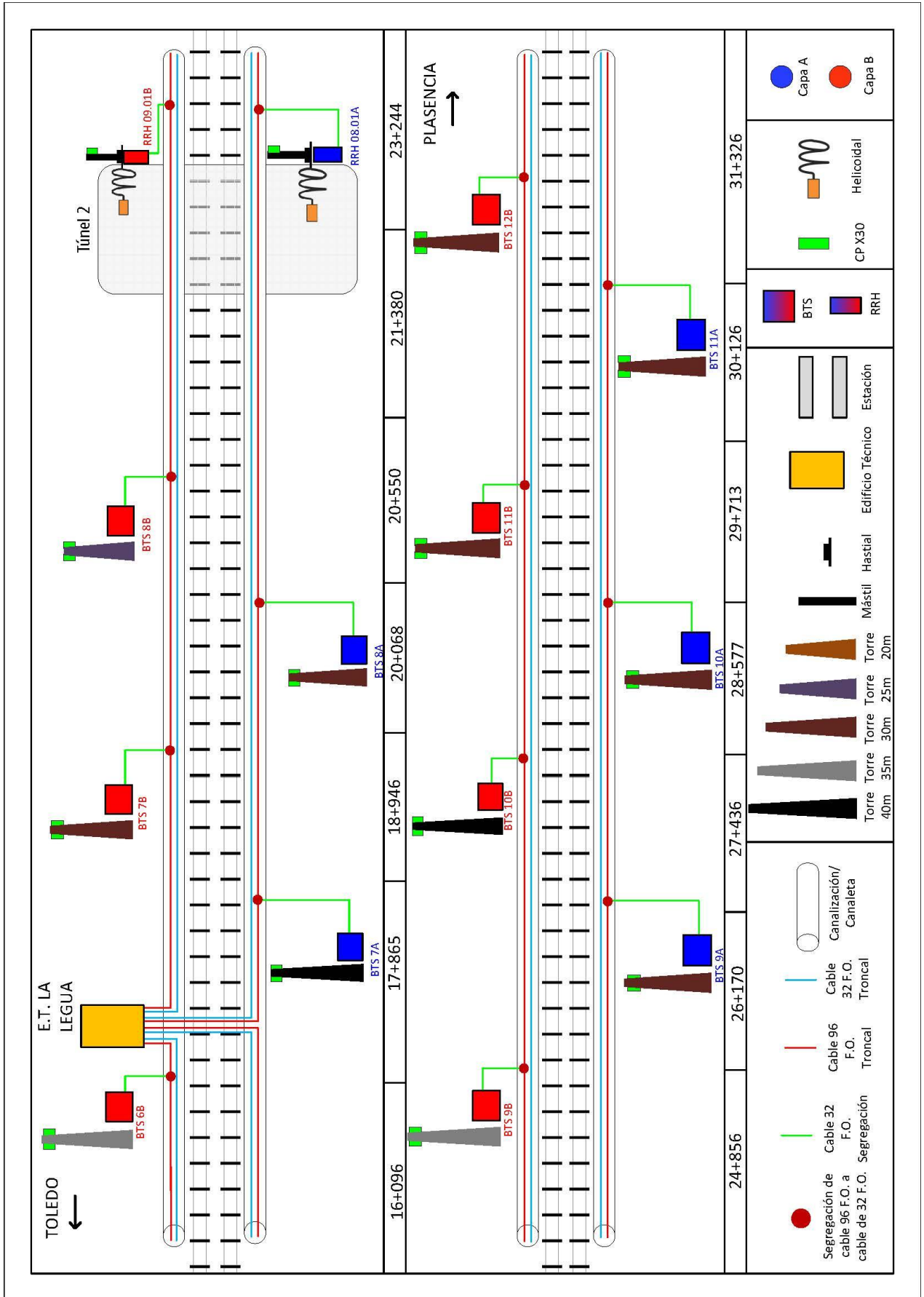




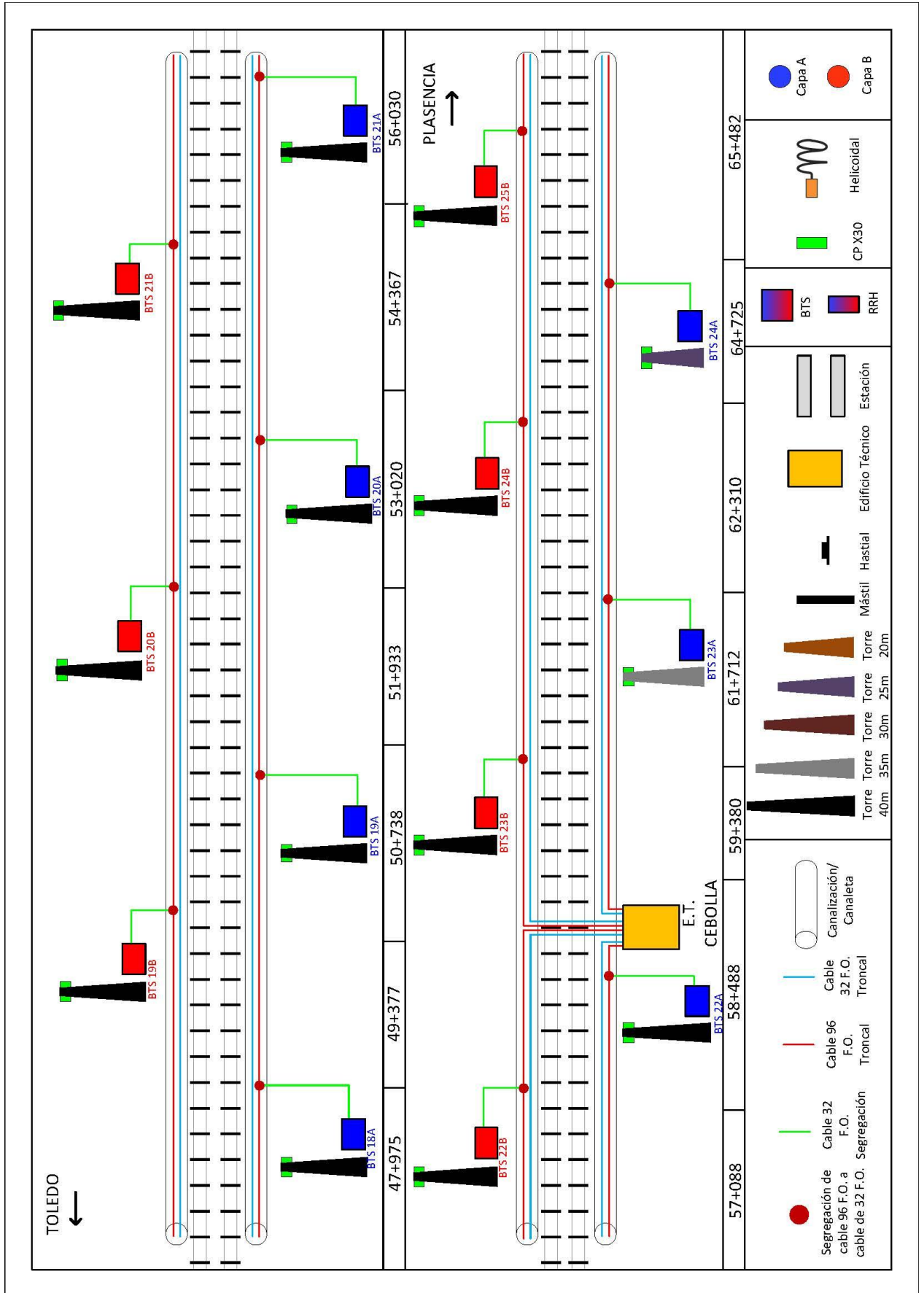


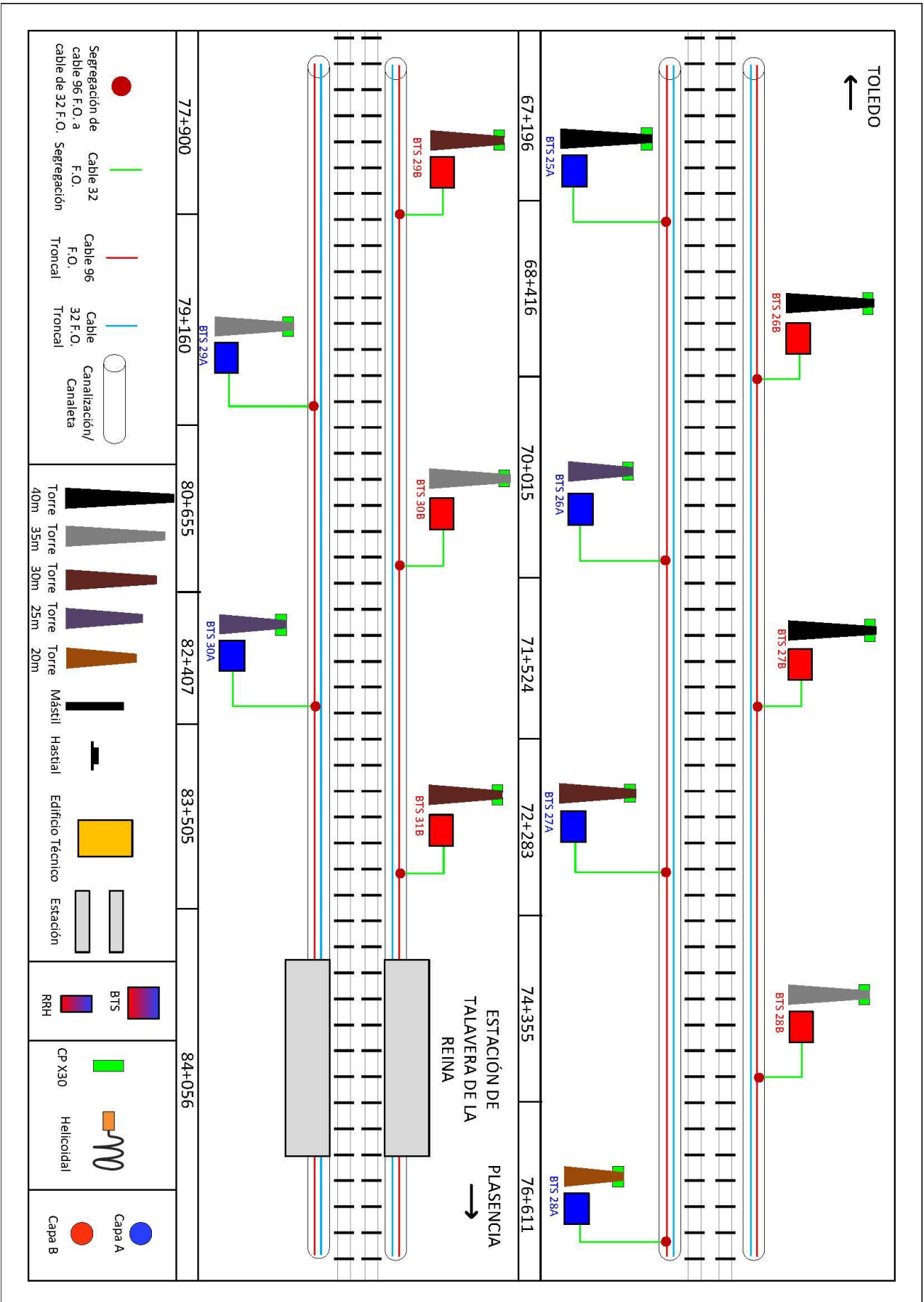
### A.3 Tira de vía. Tendido Fibra Óptica. Tramo Toledo - Talayuela

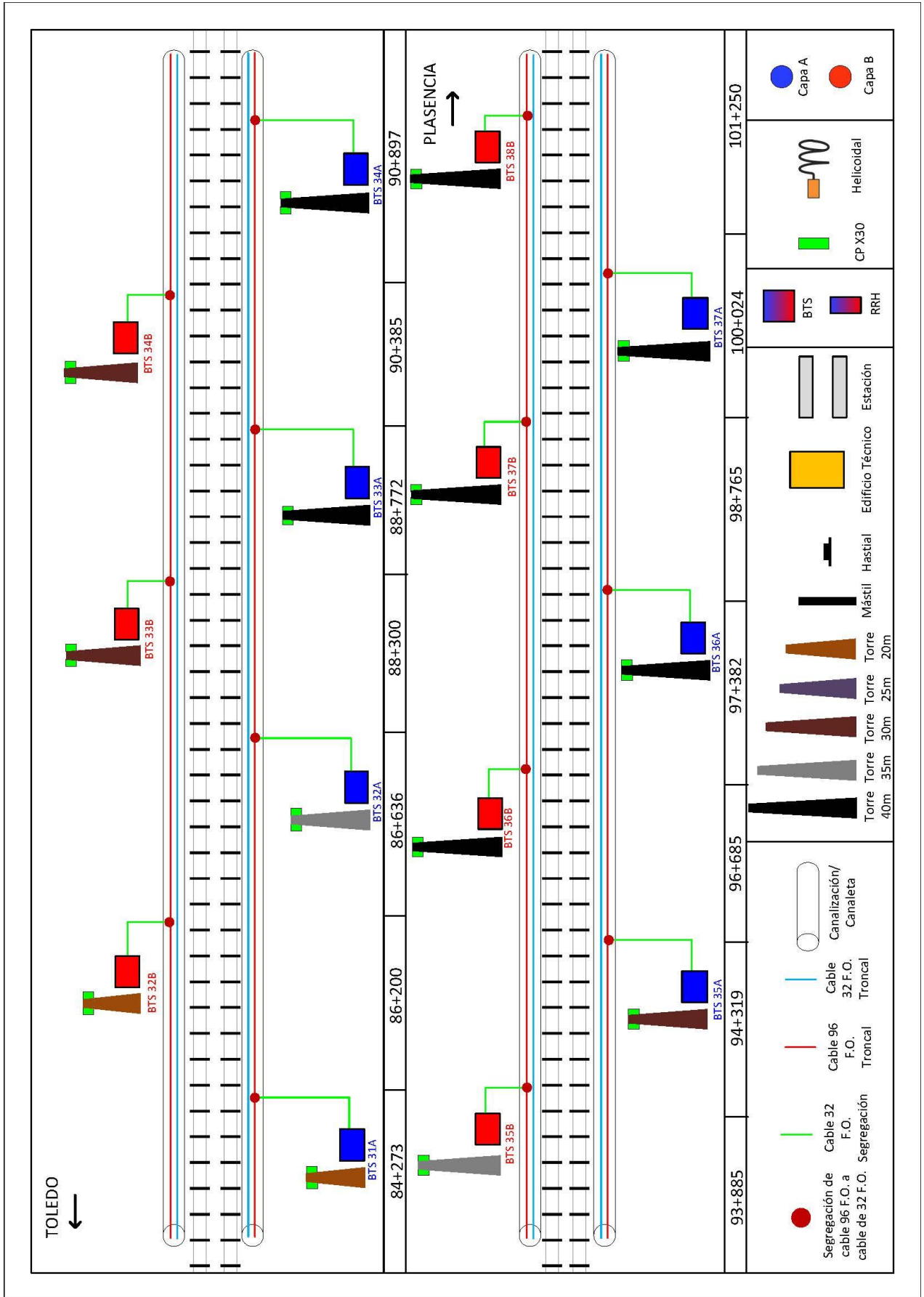


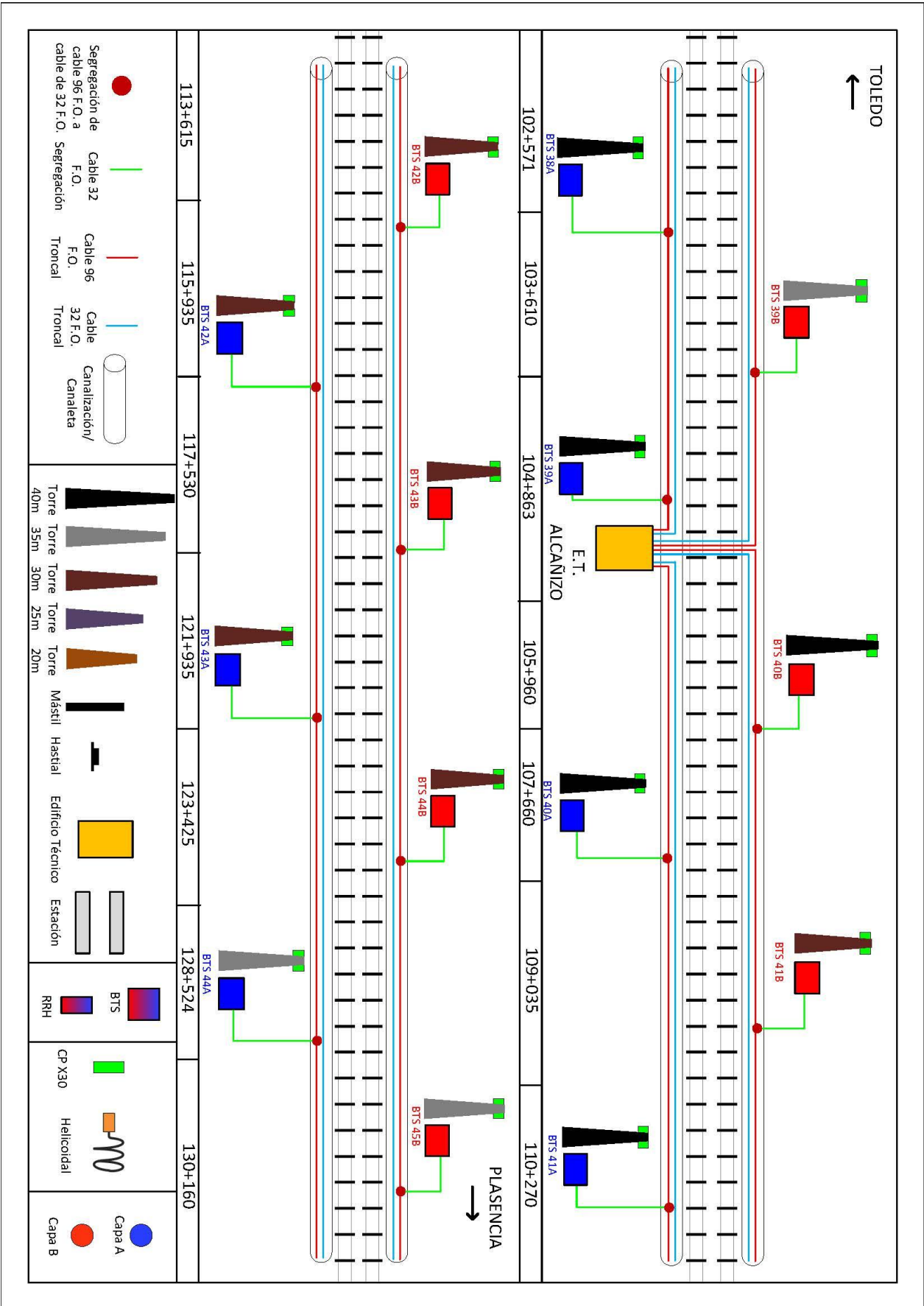


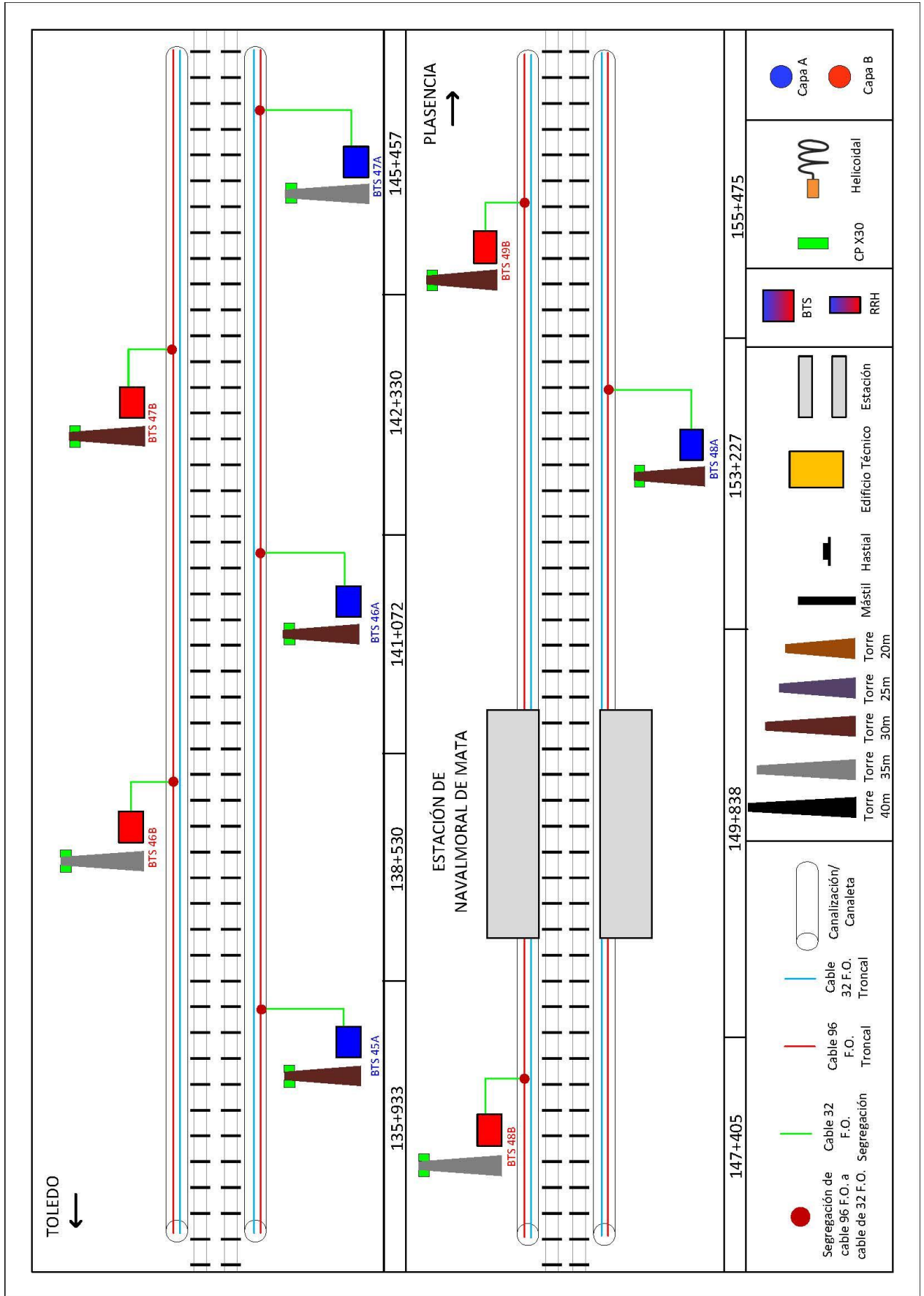




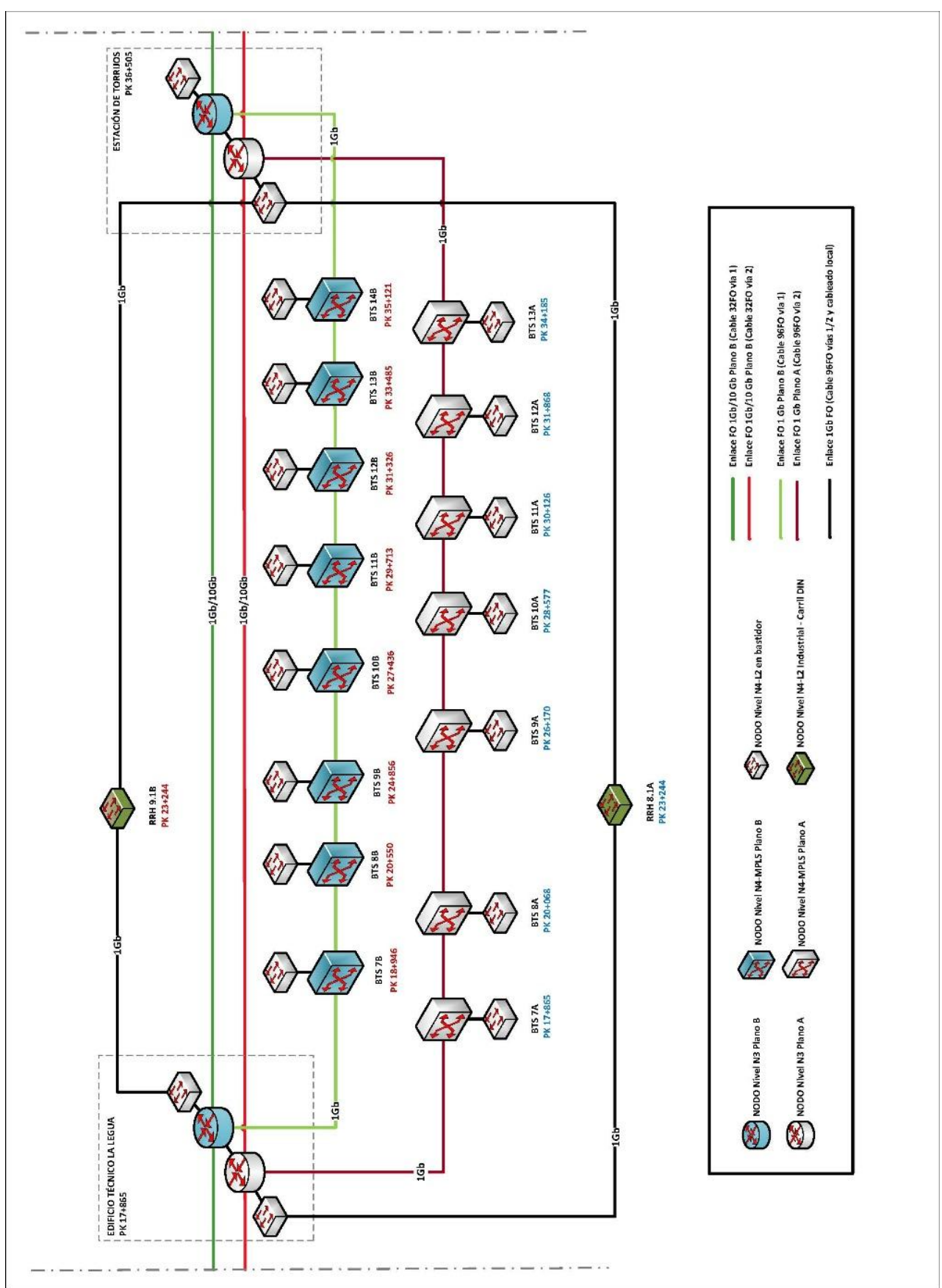


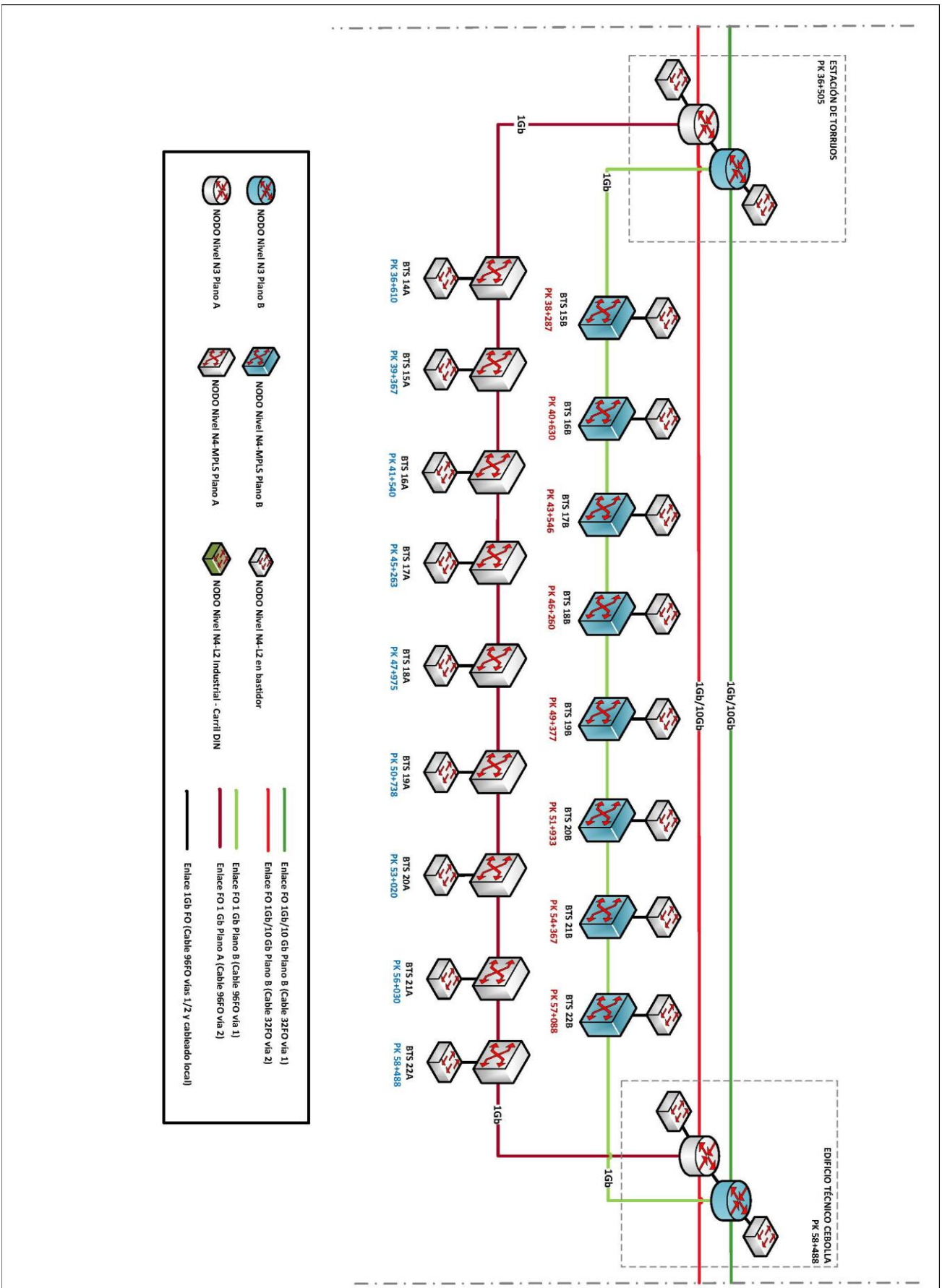


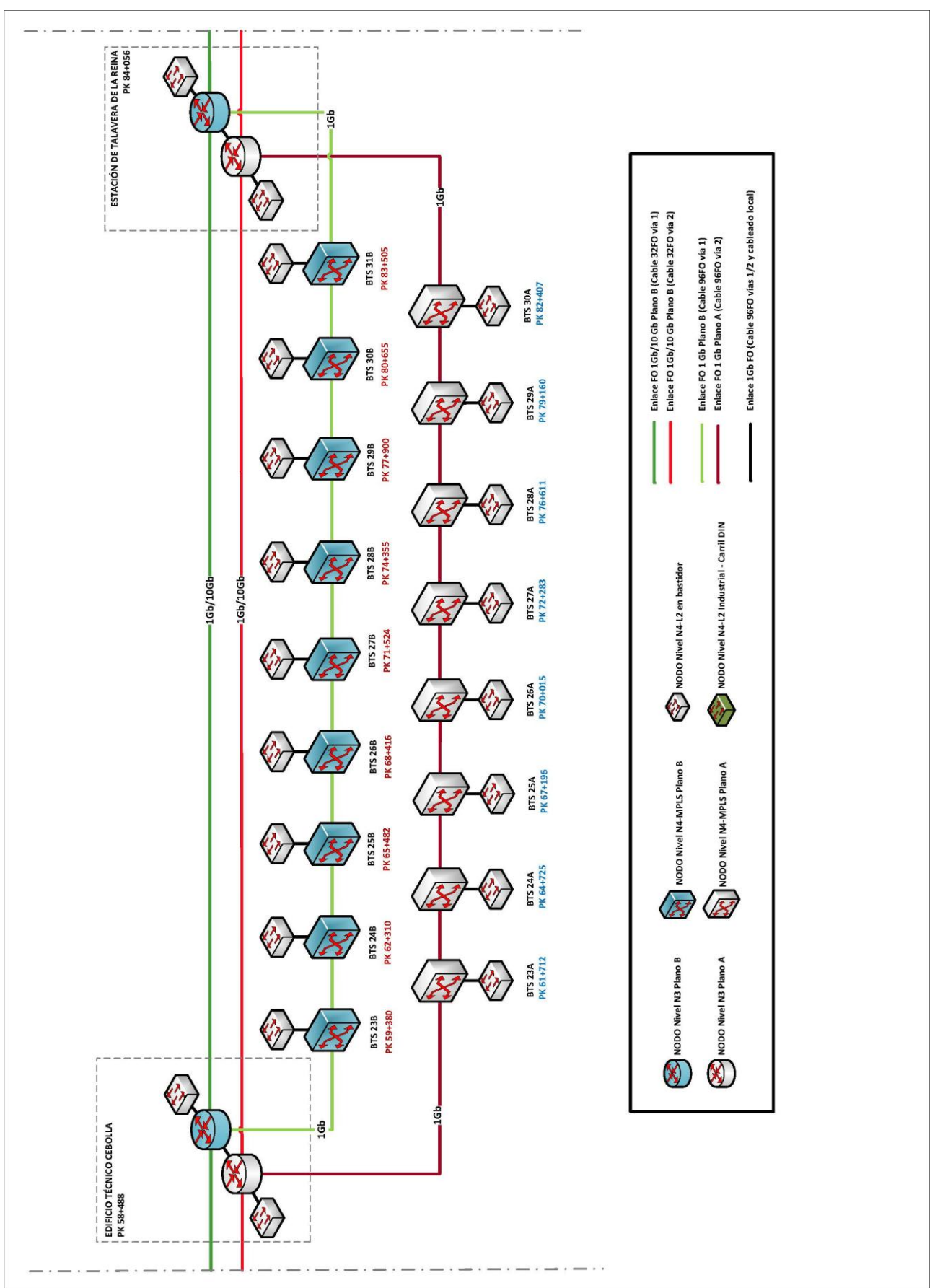




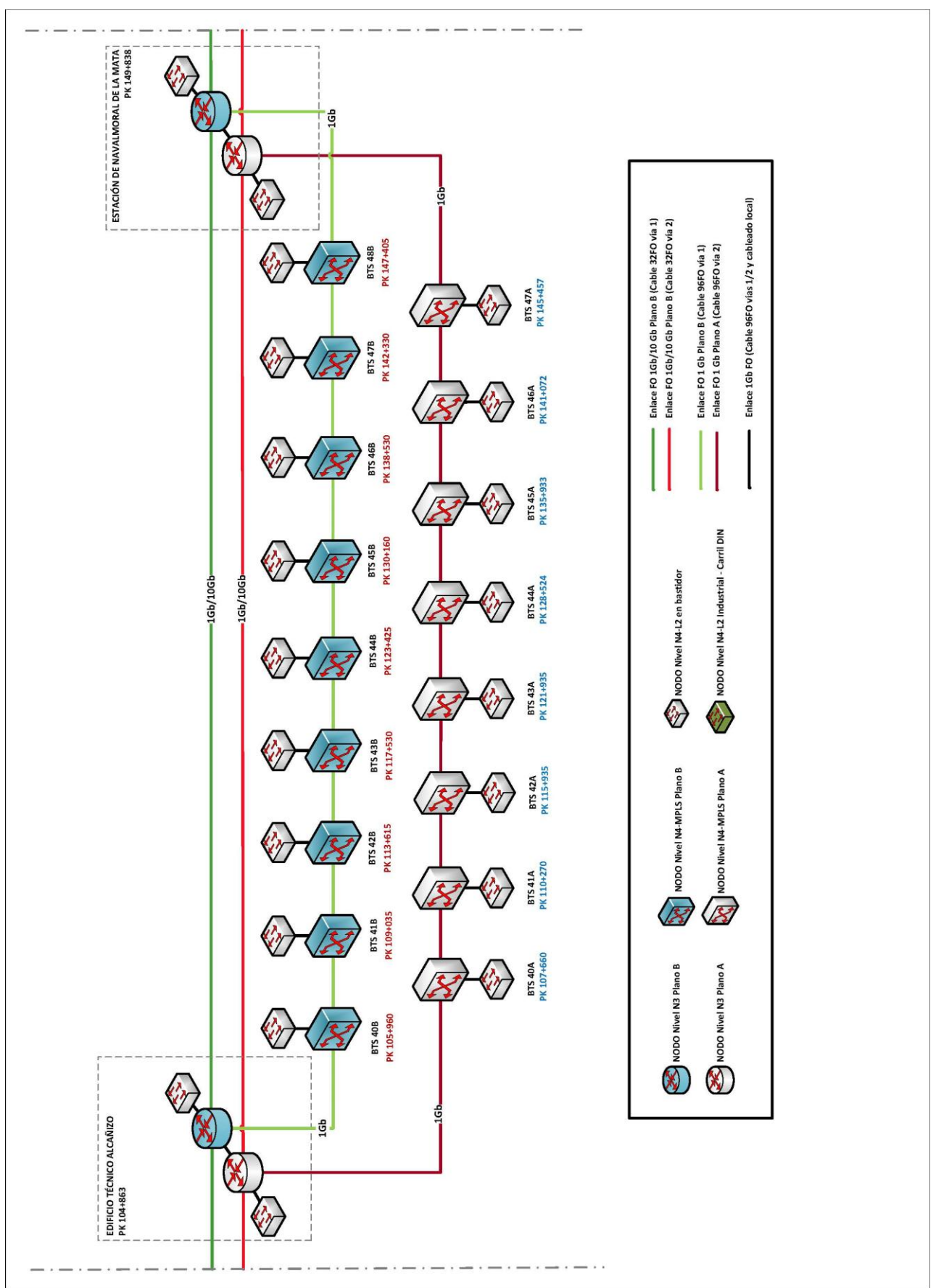






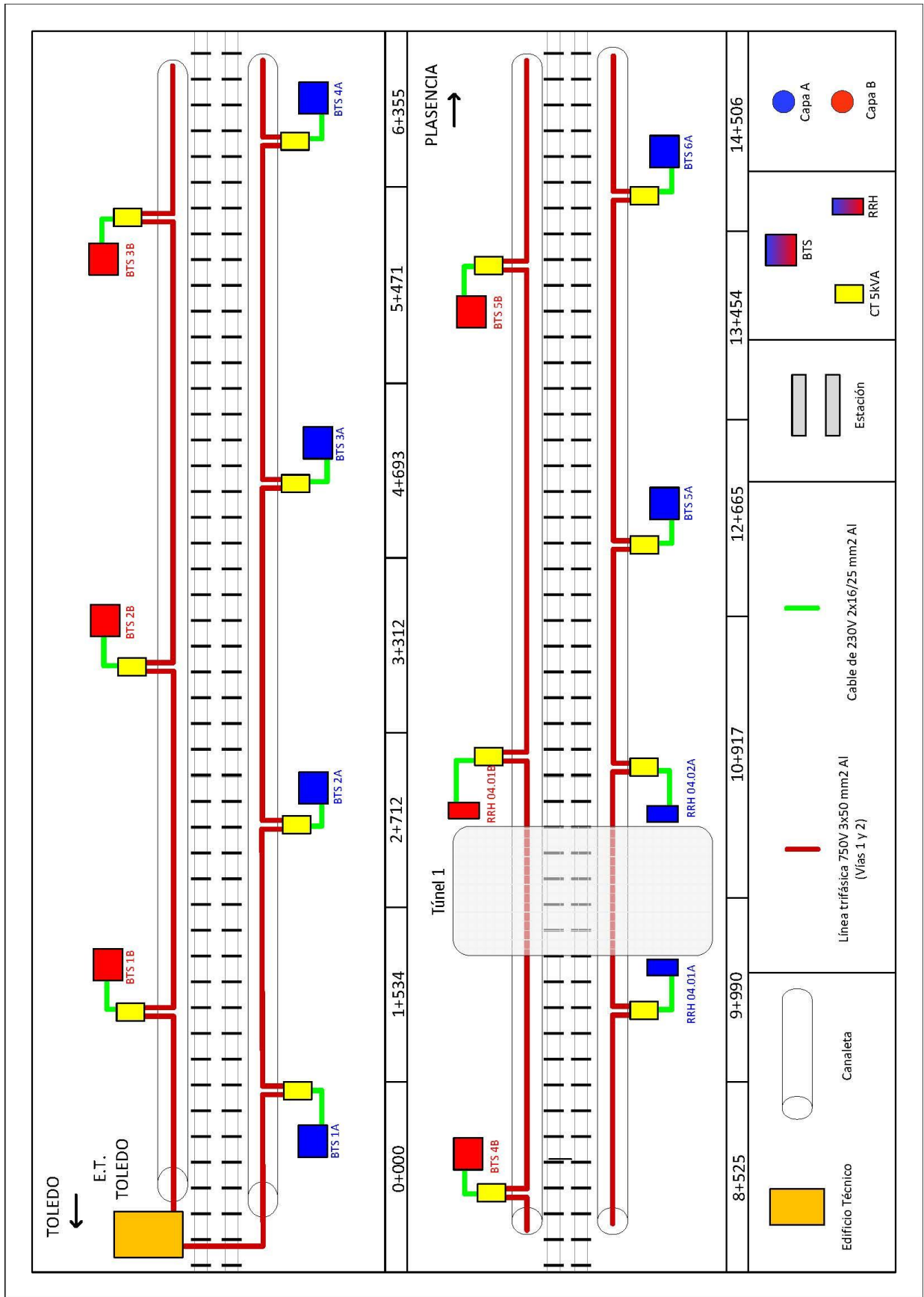


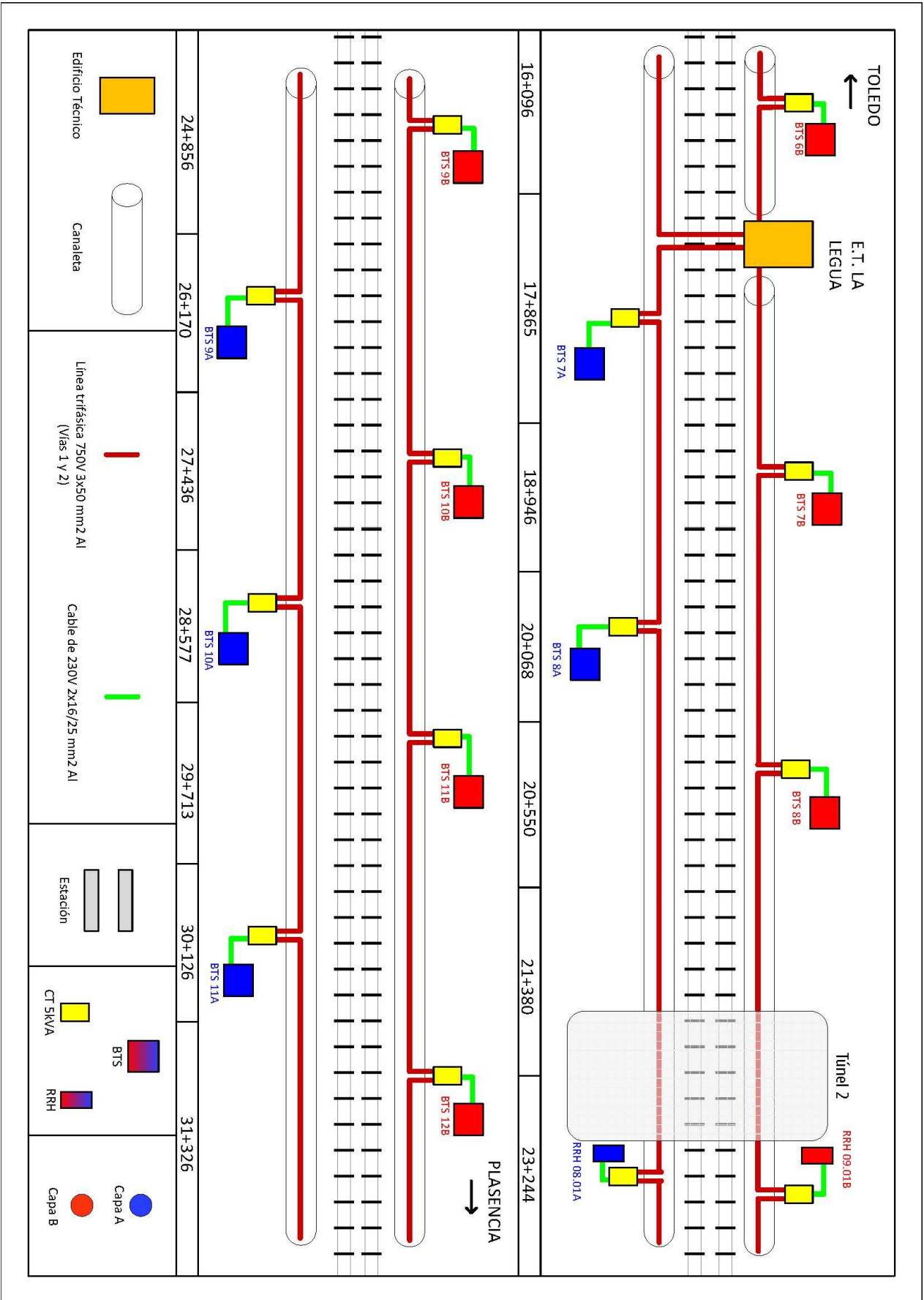


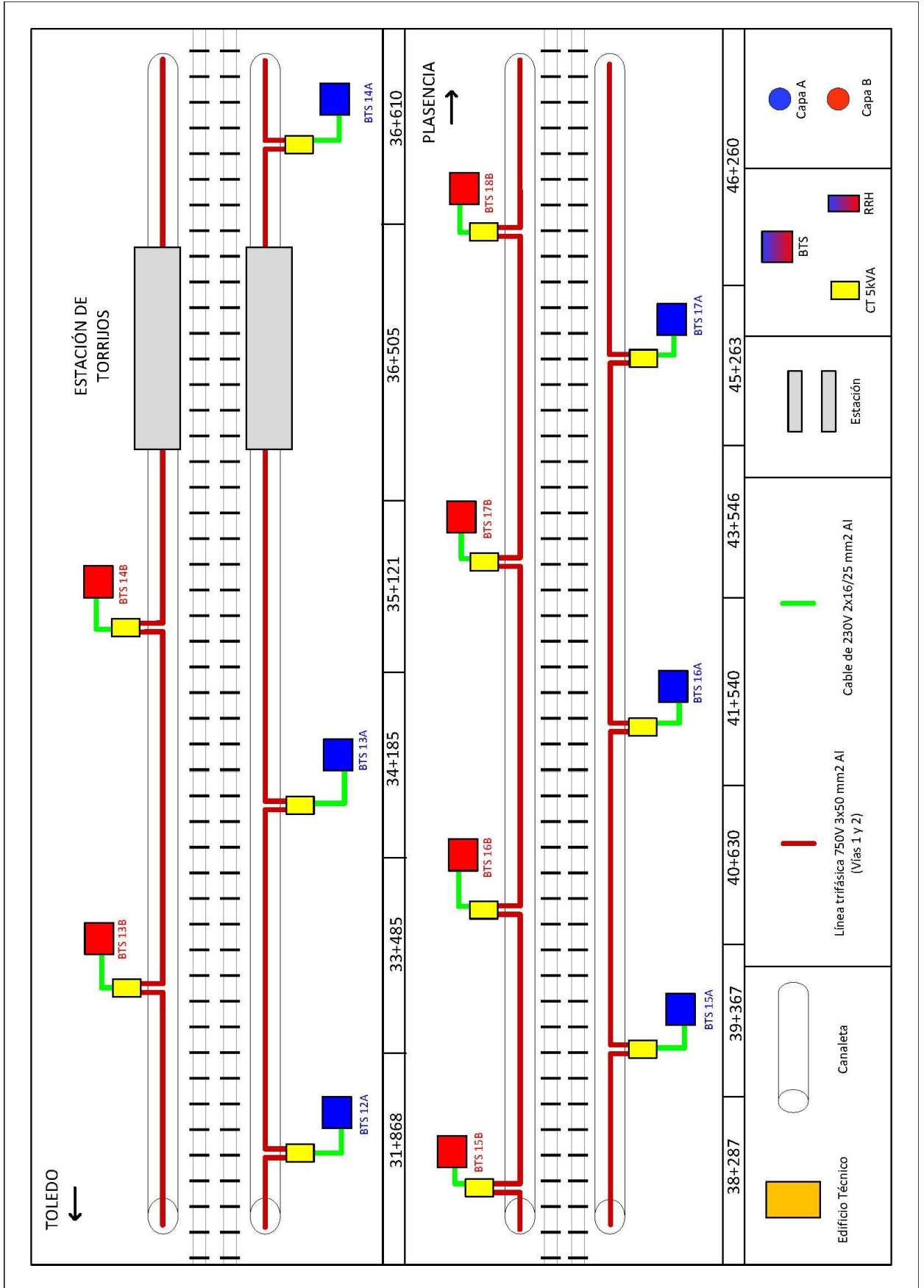


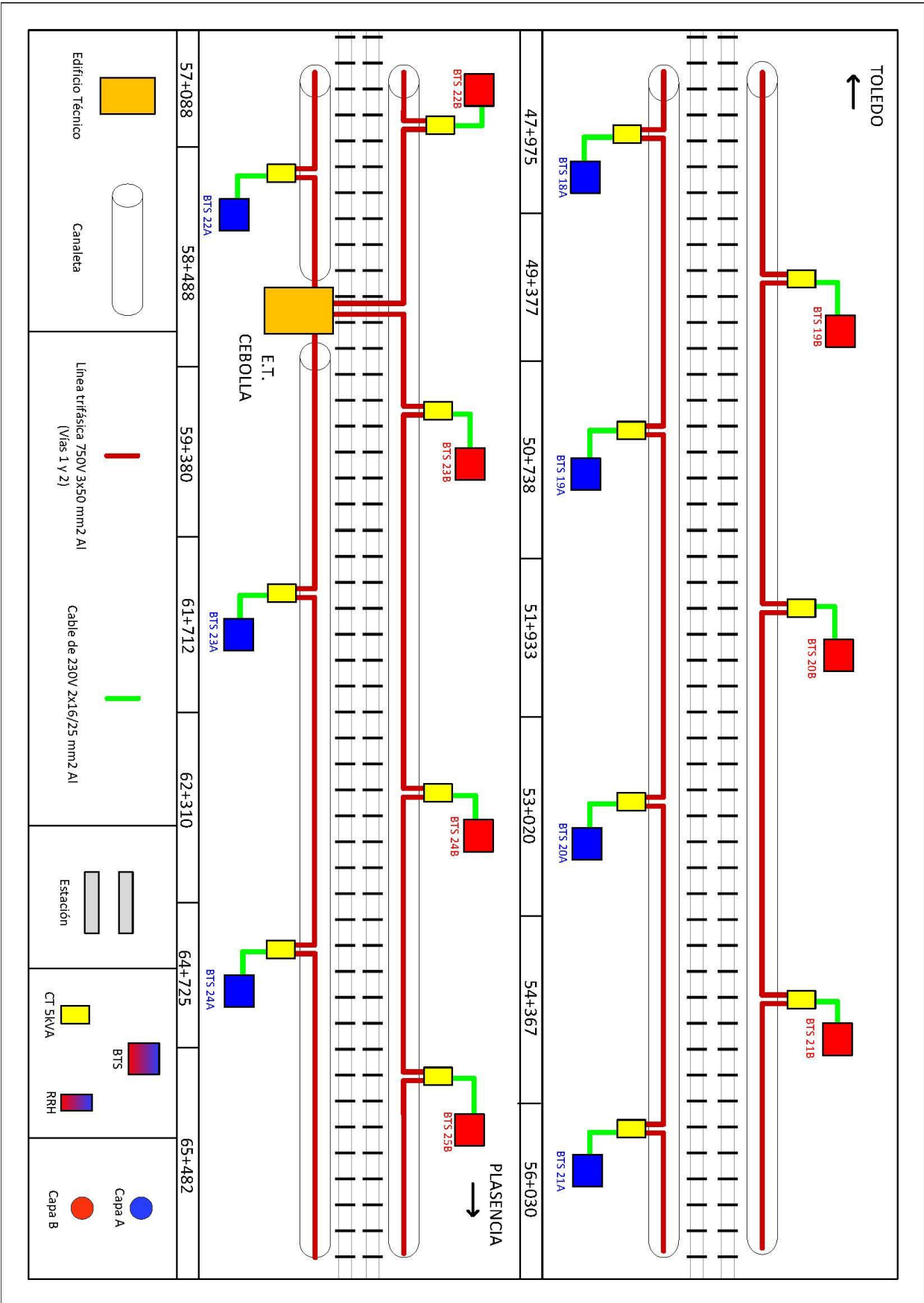


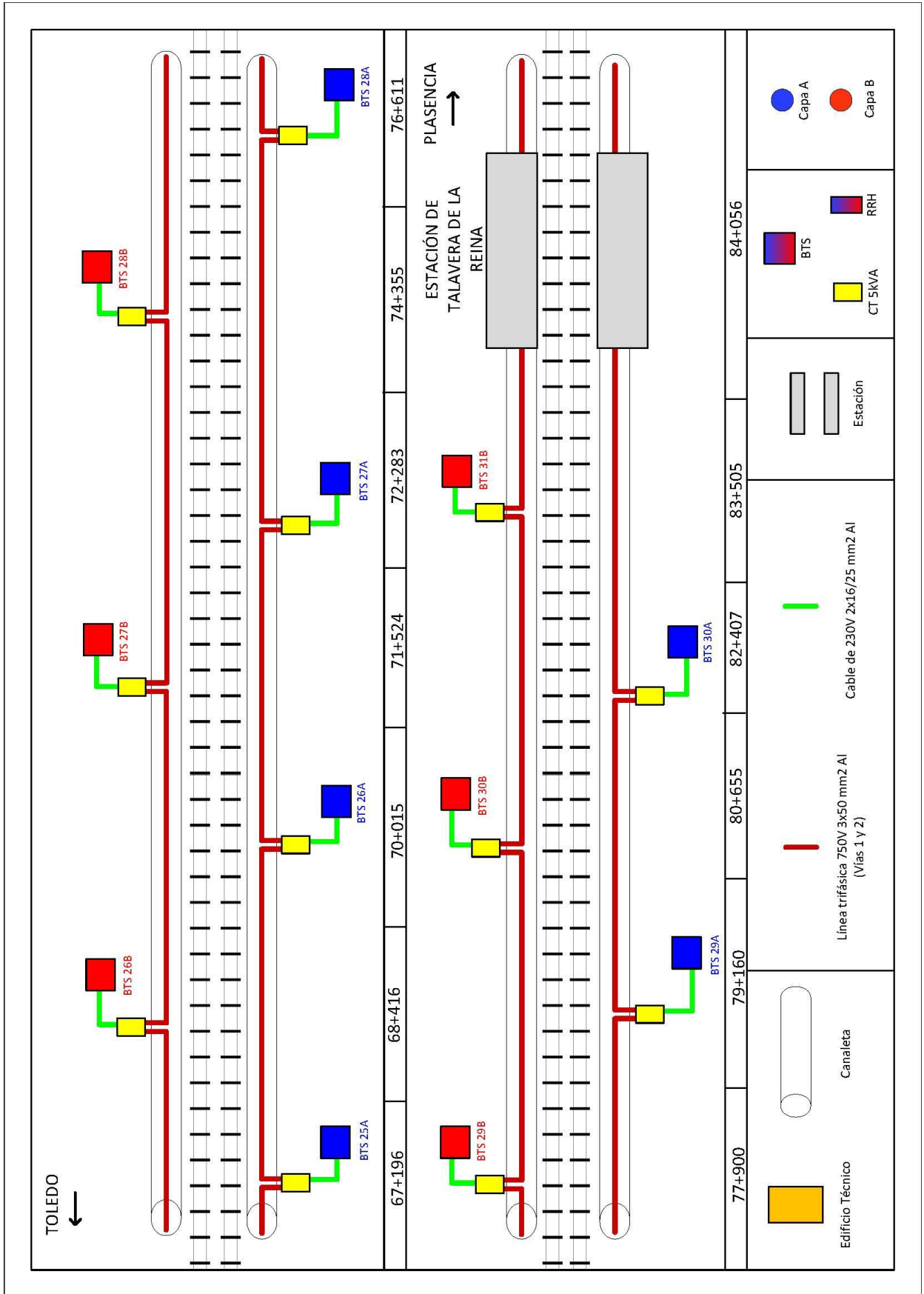
A.5 Tira de vía. Suministro de Energía. Tramo Toledo - Talayuela

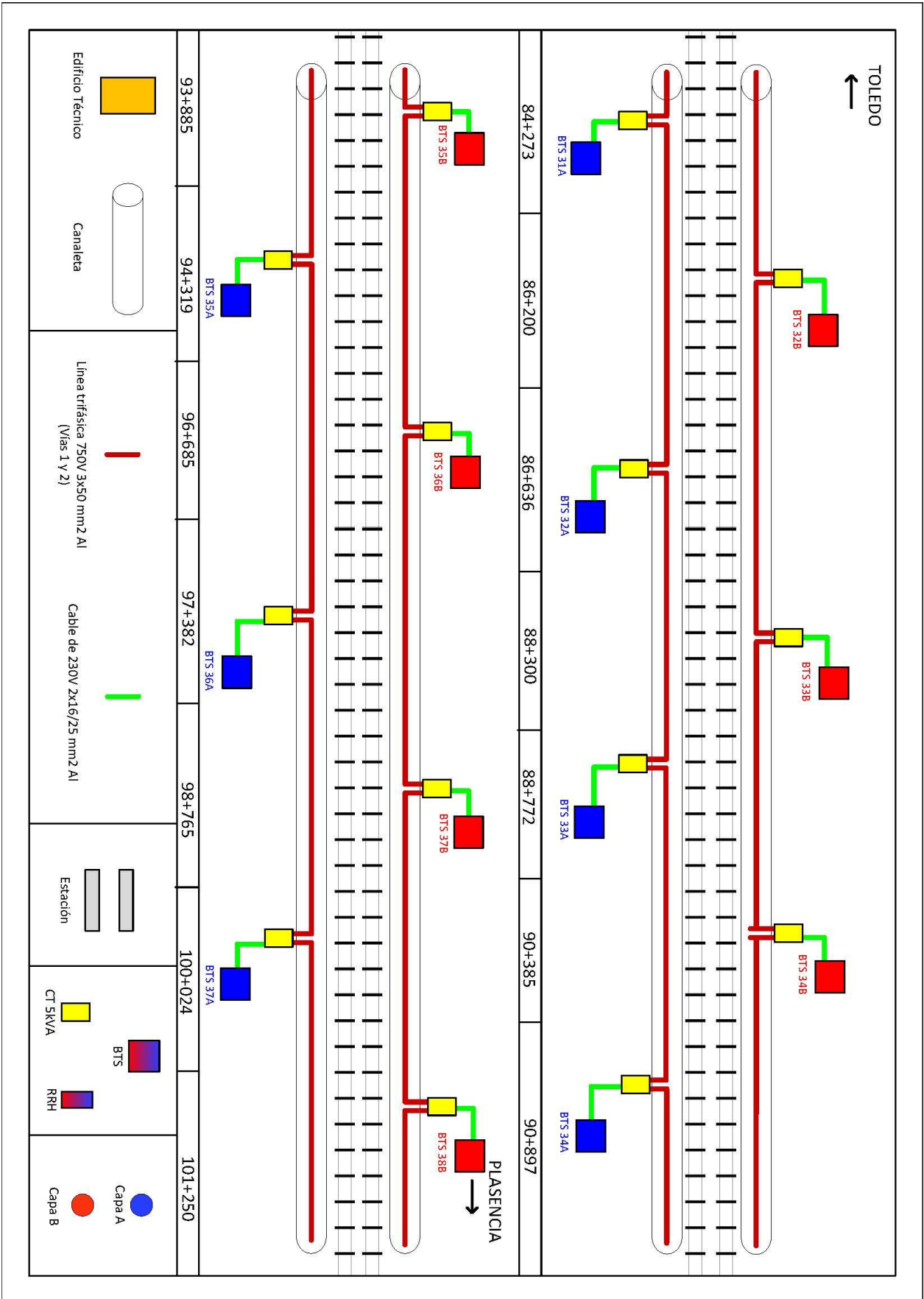


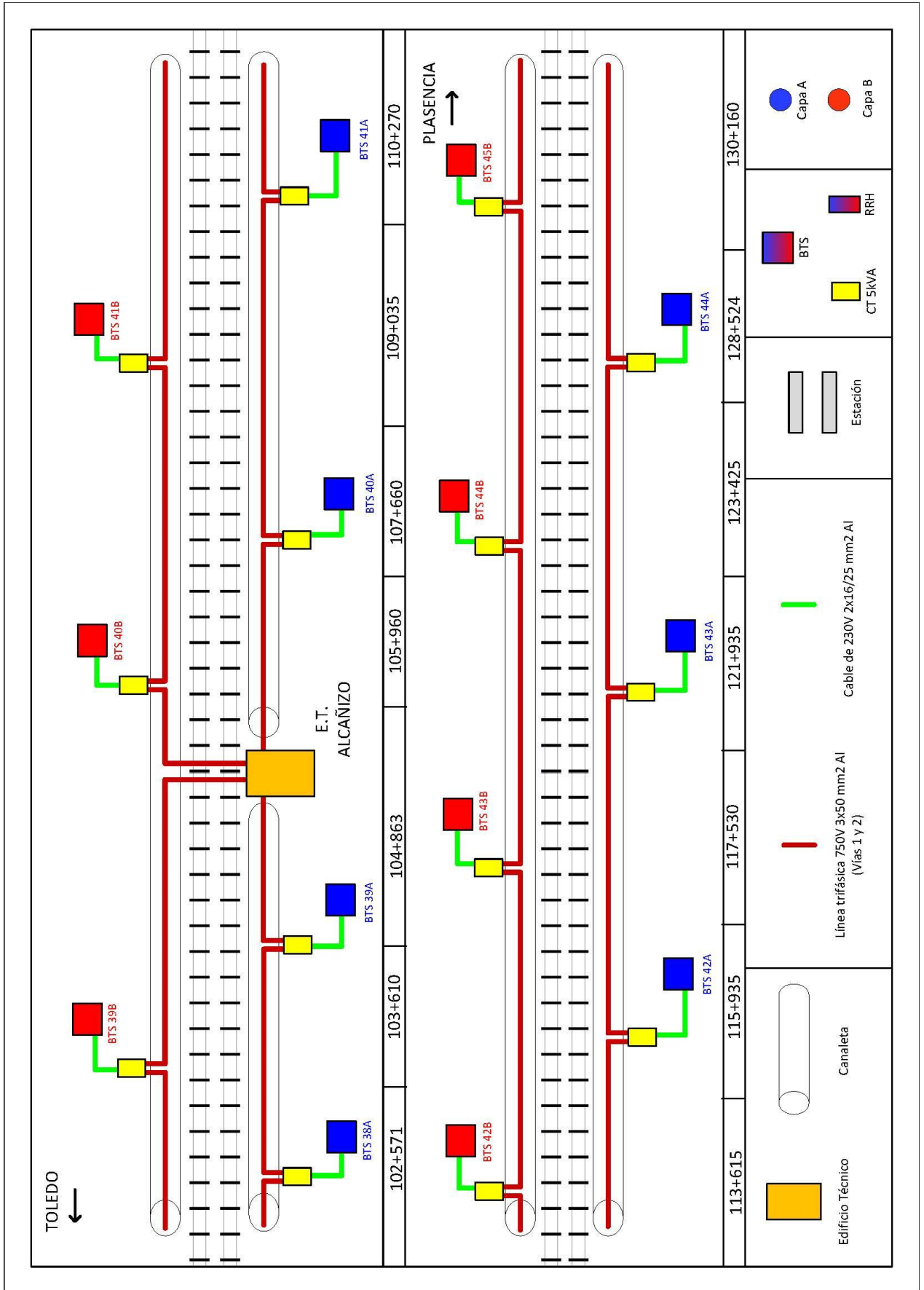


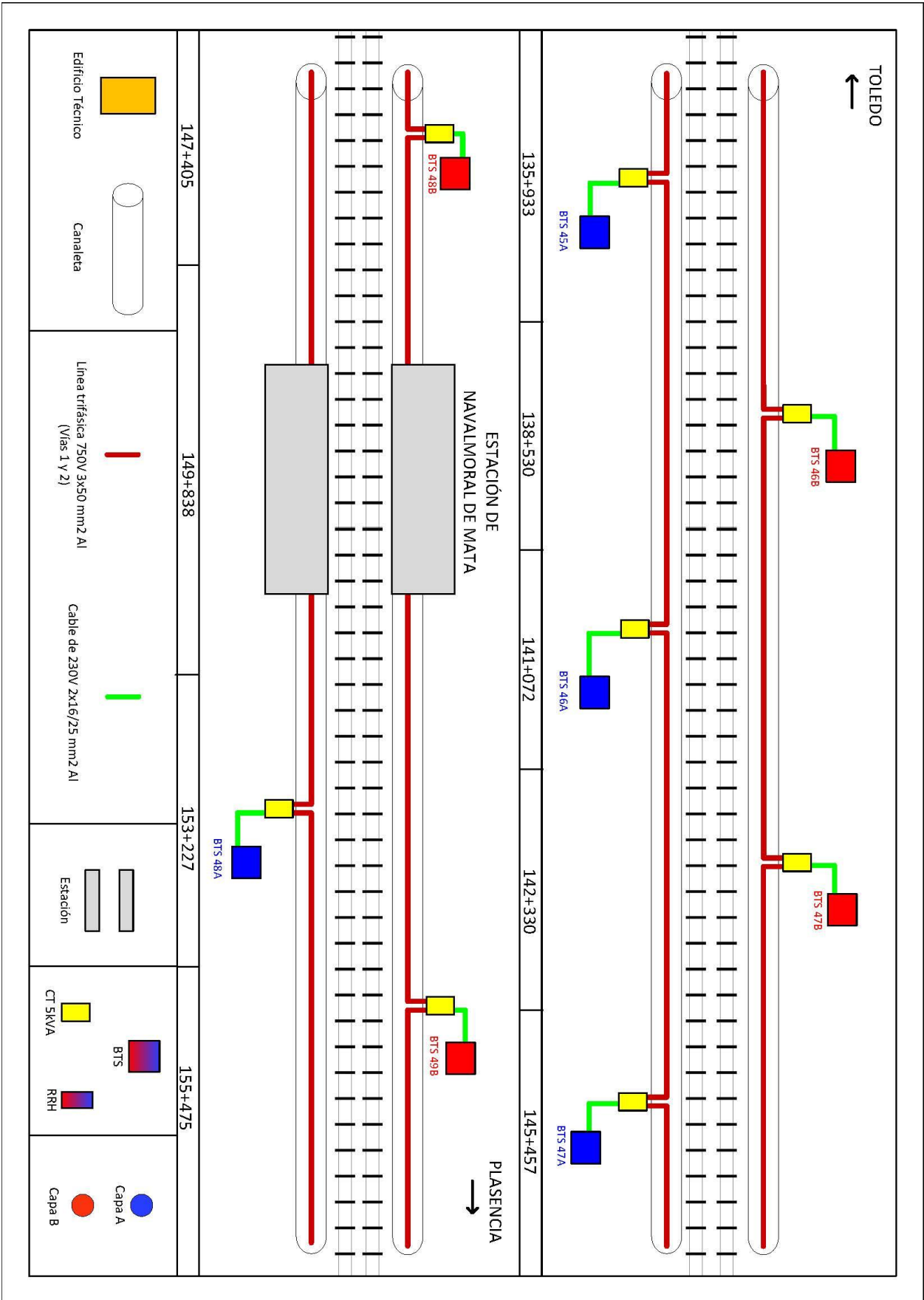














Madrid, 14 de abril de 2025

La Gerencia de Telecomunicaciones Terrestres de INECO, autoriza al alumno D. Diego Simal Albiñana, de la Universidad Politécnica de Madrid, al uso de la información confidencial de la empresa para la realización del TFG "Análisis y Diseño de una Red de Comunicaciones Móviles FRMCS en una Línea de Alta Velocidad". Como condiciones contractuales, el estudiante se obliga a la utilización únicamente para fines académicos de dicha información y a no proporcionar a terceras personas información sobre actividades o procesos de cualquier clase que fuesen observadas durante la realización del proyecto que afecten a terceras entidades.

En cuanto al proyecto original del que deriva el TFG, el proyecto será declarado de carácter público en el momento que se saque a licitación, siendo de libre acceso para quién esté interesado. Para la realización del presente TFG se ha utilizado la información del proyecto original como punto de partida, realizándose las modificaciones pertinentes y añadiendo el contenido académico necesario para que el trabajo pueda ser considerado independiente y original por sí mismo.

Atentamente, el representante de INECO

A blue ink handwritten signature, appearing to read "Carlos Díez Sánchez", written over a faint blue line.

Digitally signed by DIEZ  
SANCHEZ CARLOS - DNI  
50321225P  
Date: 2025.04.14 12:18:43  
+02'00'

Carlos Díez Sánchez  
Gerente de Área de la G. de Telecomunicaciones Terrestres

Pº de La Habana, 138  
28036 Madrid, España  
T +34 914 521 200  
F +34 914 521 300  
[www.ineco.com](http://www.ineco.com)