



Estudio y Diseño de un Sistema Tren-Tierra de Banda Ancha para Ferrocarriles Suburbanos

Danae Anahí Suzarte Vásquez

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación (Plan 2017)

Área de Tecnologías de Antenas

Directores de Proyecto: Dra. Aurora Andújar y Dr. Jaume Anguera

Junio de 2020



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Estudio y Diseño de un Sistema Tren-Tierra de Banda Ancha para Ferrocarriles Suburbanos</i>
Nombre del autor:	<i>Danae Anahí Suzarte Vásquez</i>
Nombre del consultor/a:	<i>Aurora Andújar Linares y Jaume Anguera Pros</i>
Nombre del PRA:	<i>Germán Cobo Rodríguez</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	06/2020
Titulación:	<i>Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación (Plan 2017)</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Tecnologías de Antenas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español</i>
Palabras clave:	<i>Radiocomunicaciones y trenes</i>

Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): *Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados y conclusiones del trabajo.*

Los sistemas de comunicaciones inalámbricas han cobrado una relevancia muy significativa en los medios de transporte públicos. Tanto es así, que dichos sistemas impactan de forma directa en el rendimiento del transporte y en el valor añadido que pueden proporcionar tanto a los operadores de las infraestructuras como a los clientes.

Este trabajo tiene la finalidad de exponer los factores que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de un sistema de comunicaciones tren-tierra de banda ancha en el contexto del transporte público ferroviario metropolitano suburbano.

Para ello, se describen los principales servicios a considerar en el diseño del sistema, se plantean las distintas problemáticas que afectan a la propagación de las señales radio en el entorno de un túnel y se detallan las tecnologías más avanzadas que pueden facilitar el camino hacia la convergencia radio en el sector de la industria ferroviaria.

Por último, para trasladar al ámbito práctico el conocimiento adquirido y presentar el conjunto de premisas que se debe abordar en el diseño de una red tren-tierra de banda ancha, se propone un escenario de aplicación real que servirá como ejemplo para reflejar la complejidad subyacente en un despliegue de estas características.

Como conclusión del trabajo, destacar el horizonte de posibilidades que existen para continuar desarrollando y avanzando en el campo de las radiocomunicaciones ferroviarias suburbanas, para evolucionar hacia un modelo de transporte eficiente, sostenible, seguro y en el que trenes y clientes dispondrán de una conectividad de alta velocidad.

Abstract (in English, 250 words or less):

Wireless communication systems have gained very significant relevance in public transportation. This kind of systems has a major impact on the performance of transport and it provides add value to both infrastructure operators and clients.

This project aims at setting out the factors to be considered when designing a broadband train-to-ground communications system in the context of suburban metropolitan rail public transport.

To achieve this goal, it describes the main services to consider in the system design, raises different problems that affect radio signals propagation in the environment of a tunnel and details the most advanced technologies that can facilitate the path towards radio convergence in the railway industry.

Finally, in order to bring the acquired knowledge into the practical scope and to present the set of premises to be addressed in the design of a broadband train-to-ground network, a real application scenario is proposed that will serve as an example to reflect the underlying complexity in such a deployment.

As a conclusion, it is important to highlight the horizon of possibilities that exist to continue developing and advancing in the field of suburban rail radiocommunications in order to evolve towards an efficient, sustainable, safer transport model in which trains and customers will make use of high-speed connectivity.

Índice

CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	2
1.1 Contexto y justificación del Trabajo.....	2
1.2 Objetivos del Trabajo.....	2
1.3 Enfoque y método seguido.....	3
1.4 Planificación del Trabajo	4
1.5 Breve resumen del producto obtenido.....	6
1.6 Breve descripción de los capítulos de la memoria	6
CAPÍTULO 2	8
2. Servicios de comunicaciones en el entorno ferroviario suburbano.....	9
2.1 Servicios críticos	9
2.1.1 Sistema de señalización CBTC.....	10
2.2 Servicios no críticos orientados a la operativa del tren.....	12
2.3 Servicios no críticos orientados a mejorar la experiencia de los clientes	14
CAPÍTULO 3	16
3. La propagación de las señales radio en túneles	17
3.1 Modelos de propagación en túneles.....	17
3.1.1 Método basado en la teoría modal.....	19
3.1.2 Método basado en la óptica geométrica y en el trazado de rayos ...	20
3.1.3 Conclusiones del estudio teórico de la propagación en túneles.....	21
3.2 Diagrama de radiación y posición de la antena.....	22
3.2.1 Sistemas multiantena	23
CAPÍTULO 4	24
4. Tecnologías inalámbricas disponibles.....	25
4.1 Evolución de las comunicaciones móviles: de 2G a 4G y horizonte hacia 5G	26
4.1.1 3GPP LTE	31
4.1.2 La nueva radio 5G.....	34
4.2 Estándar 802.11	36
4.3 Selección de la tecnología.....	40
CAPÍTULO 5	45
5. Diseño de la red TTBA para la tecnología seleccionada.....	46
5.1 Datos de partida del escenario.....	46
5.1.1 Datos de la Línea 8.....	47
5.2 Requisitos funcionales.....	51
5.2.1 Cobertura y redundancia.....	52
5.2.2 Niveles de señal en IEEE 802.11ac	53
5.3 Procedimiento de diseño	54
5.3.1 Solución de equipamiento a contemplar	55
5.3.1.1 Equipamiento para la infraestructura de tierra	56
5.3.1.2 Equipamiento embarcado.....	63
5.4 Simulaciones	64
5.5 Valoración económica del proyecto.....	70
CAPÍTULO 6	72
6. Conclusiones.....	73
CAPÍTULO 7	76
7. Glosario.....	77

CAPÍTULO 8	81
8. Bibliografía	82
CAPÍTULO 9	86
9. Anexos	87

Lista de figuras

Figura 1. Planificación de tareas y subtareas del trabajo	5
Figura 2. Modelo de interacción de proyectos estratégicos de Metro de Madrid [1]	9
Figura 3. Cantón fijo vs. cantón móvil [4]	11
Figura 4. Equipamiento de vía y a bordo del tren en un sistema CBTC [5].....	11
Figura 5. Comunicación tren-tierra en el sistema de señalización CBTC [6]....	12
Figura 6. Elementos del sistema de vídeo embarcado.....	14
Figura 7. Secciones típicas de un túnel [9].....	17
Figura 8. Fenómenos físicos presentes en un canal radio [11]	18
Figura 9. Fenómeno causado por el multitrayecto	18
Figura 10. Simulaciones del modelo de la teoría de rayos propuestos en [15]	21
Figura 11. Diagramas de radiación de antenas [16].....	22
Figura 12. Esquema de un sistema MIMO [17]	23
Figura 13. Posicionamiento de estándares <i>Wireless</i> [18].....	25
Figura 14. Evolución de la tecnología móvil [21]	26
Figura 15. Arquitectura de la red GSM [22].....	28
Figura 16. Arquitectura de la red GPSR [24].....	29
Figura 17. Arquitectura de la red UMTS [25].....	30
Figura 18. Multiplexación de usuarios en OFDMA [26]	31
Figura 19. Esquema SC-FDMA para el enlace ascendente [26].....	31
Figura 20. Arquitectura de la red LTE [27]	32
Figura 21. Ejemplo de red heterogénea con diversos tipos de celda [28]	33
Figura 22. Redes de macro-celdas frente a redes de celdas pequeñas [29] ...	33
Figura 23. Casos de uso 5G.....	34
Figura 24. Coexistencia redes LTE-5G NR [30]	36
Figura 25. Solución del fabricante ACKSYS de comunicación WiFi [32].....	37
Figura 26. Algoritmo simplificado CSMA/CA [34]	38
Figura 27. Redundancia en vía con IEEE 802.11 ac.....	42
Figura 28. Canales y bandas de frecuencia estándar 802.11ac [39].....	43
Figura 29. Trazado de la Línea 8 (color rosa) [45]	48
Figura 30. Plano con cotas de la serie 8000 MSRM que circula por la Línea 8 [47]	50
Figura 31. Equipamiento de tierra y tren de la red TTBA con elementos de Cisco [51]	55
Figura 32. Esquema de la topología física de conexión en la Línea 8 basada en <i>switch blocks</i>	56
Figura 33. MU MIMO en estándar 802.11ac [55]	57
Figura 34. Patrones de radiación de la antena [56].....	59
Figura 35. CAPWAP establecido entre los AP conectados a una controladora [57]	60
Figura 36 . Criterios de selección de modelo de <i>switch</i> dentro de la gama IE4000 [59]	61
Figura 37. Dimensiones mecánicas del <i>switch</i> IE4000 (vista frontal, lateral y trasera) [59].....	61

Figura 38. Dimensiones mecánicas del <i>switch</i> IE4000 (vista superior e inferior) [59]	62
Figura 39. Redundancia de cobertura de estaciones base	63
Figura 40. EB embarcada en la cabina del tren (coche M)	63
Figura 41. Comunicaciones inalámbricas tren-tierra	64
Figura 42. AP embarcados configurados en modo WGB (clientes de AP de tierra)	64
Figura 43. Tramo recto de Línea 8 de 1 km [45]	65
Figura 44. Interfaz del programa <i>Ekahau</i>	66
Figura 45. Definición de los muros del túnel con <i>Ekahau</i>	66
Figura 46. Definición de requisitos de cobertura del tren en <i>Ekahau</i>	67
Figura 47. Definición del área con el consumo de datos de dos trenes en <i>Ekahau</i>	67
Figura 48. Parámetros de configuración del AP en <i>Ekahau</i>	67
Figura 49. Menú " <i>Options</i> " del programa <i>Ekahau</i>	68
Figura 50. Tramo curvo de Línea 8 de 2 km [45].....	69

Lista de tablas

Tabla 1. Descripción de los capítulos del trabajo	7
Tabla 2. Requisitos para la transmisión de la voz	10
Tabla 3. Requisitos CBTC de la red radio	12
Tabla 4. Requisitos de la red radio para el sistema de Información al viajero..	13
Tabla 5. Requisitos de la red radio para la telemetría del tren	13
Tabla 6. Requisitos de la red radio para CCTV	14
Tabla 7. Atenuación de los modos híbridos EH a 2.4 y a 10 GHz [12].....	19
Tabla 8. Tamaño de microceldas en túneles según [15]	21
Tabla 9. Especificaciones enmiendas WiFi según [36]	40
Tabla 10. Tabla comparativa con datos de distintas tecnologías	42
Tabla 11. Datos macro de Metro de Madrid a cierre del año 2018 [43].....	47
Tabla 12. Conjunto de imágenes representativas de estaciones de Línea 8 ...	48
Tabla 13. Estimación total del tráfico de datos	51
Tabla 14. Estimación total de tráfico con dos trenes coincidentes por celda ...	52
Tabla 15. PIRE máximas autorizadas en subbandas de 5 GHz [49].....	53
Tabla 16. Niveles de señal WiFi según [50]	54
Tabla 17. Conexiones del AP [54].....	57
Tabla 18. Especificaciones técnicas de la antena [56].....	58
Tabla 19. Prioridad definida en función de la criticidad del servicio	62
Tabla 20. Valoración económica equipamiento de tierra.....	70
Tabla 21. Valoración económica equipamiento embarcado	70
Tabla 22. Desglose resumen de presupuestos	71
Tabla 23. Desglose y significado de acrónimos utilizados en el trabajo	80

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Tecnología LTE en Metro de Madrid [8].....	15
Ilustración 2. Ampliación de Línea 11 con tuneladora [13]	20
Ilustración 3. Talleres de Carde y Escoriaza (Zaragoza), 1919 con los coches del Metropolitano de Madrid [41].....	46
Ilustración 4. Unidad 8000 de las destinadas a la Línea 8, durante las pruebas de puesta a punto en el Depósito de Canillejas [46]	49
Ilustración 5. Vista exterior de la serie 8000 MSRM [47]	50
Ilustración 6. Modelo de AP para cobertura de la vía [53]	56
Ilustración 7. Modelo de controladora Cisco 5500 [58].....	60
Ilustración 8. Modelos disponibles dentro de la gama IE4000 [59].....	61

CAPÍTULO 1

A yellow folder icon with a tab on the top left corner, containing the text 'INTRODUCCIÓN'.

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Durante las últimas dos décadas, las expectativas de acceso a Internet con independencia de la ubicación, han crecido de forma abrupta y la necesidad de estar conectados es cada vez mayor. Este hecho conlleva a que, en medios de transporte como los aviones, los metros o los trenes, también exista la demanda de estar permanentemente conectados. Como se intuye, disponer de conectividad en todos estos medios de transporte, resulta muy atractivo para los clientes y también para las empresas, tanto desde el punto de vista de la gestión de las infraestructuras en tiempo real, como de la seguridad.

En la actualidad, gran parte de estos servicios se llevan a cabo a través de comunicaciones vía radio, ya que permiten obtener prestaciones significativas tanto en términos de eficiencia, como de seguridad. Así, los proyectos basados en comunicaciones inalámbricas en la industria del ferrocarril son cada vez más comunes y numerosos y tienen un fuerte impacto en el rendimiento del transporte, ya que pueden conseguir aumentar la capacidad de las líneas e incluso añadir cierta seguridad adicional. El trabajo consiste, por tanto, en plantear un sistema de comunicaciones tren-tierra de banda ancha, capaz de dar respuesta a todas las necesidades radio que un tren en servicio precisa.

Este trabajo se enmarca en el ámbito ferroviario suburbano. En concreto, se va a recurrir como ejemplo al caso de Metro de Madrid, al cual acceden a diario millones de personas que demandan seguridad en sus viajes, bajos costes, tiempos de espera reducidos, puntualidad y comodidad en los servicios utilizados. Para ello, se van a estudiar las características de los distintos servicios que deben estar disponibles en una línea de metro, atendiendo a su capacidad o *throughput*, y se va a profundizar en las posibilidades que las tecnologías inalámbricas más novedosas ofrecen hoy en día, analizando cuál de ellas podría ser la más adecuada para satisfacer tanto las necesidades actuales como posibles necesidades a futuro, con la perspectiva de disponer de un metro moderno, seguro, de calidad, eficiente y comprometido con los clientes.

1.2 Objetivos del Trabajo

A continuación, se listan los principales objetivos que constituyen el eje vertebrador que ha motivado la realización del presente trabajo:

- Entender y clasificar adecuadamente los distintos servicios ferroviarios basados en las comunicaciones inalámbricas (servicios de misión crítica, servicios operacionales y servicios orientados al cliente).
- Comprender la problemática existente en cuanto a propagación de señales radio en túneles y estudiar las técnicas de modelado existentes.

- Analizar las características de las tecnologías inalámbricas más novedosas disponibles en el mercado y la viabilidad de implantarlas en entornos ferroviarios suburbanos.
- Seleccionar y justificar la tecnología inalámbrica más apropiada para un caso de uso real.
- Realizar el diseño del sistema de comunicaciones inalámbricas de banda ancha capaz de dar soporte a todos los servicios que deben ser ofrecidos en un tren de metro.
- Valorar la viabilidad económica del proyecto.

1.3 Enfoque y método seguido

Para llevar a cabo el trabajo y dar cumplimiento a los objetivos identificados en el punto anterior, se propone enfocar la estructura del proyecto y el método a seguir, en una división de cuatro bloques de contenidos a desarrollar a lo largo de diferentes capítulos. La propuesta de división de bloques es la siguiente:

- Primer bloque:

Bloque de introducción cuyo objetivo es contextualizar adecuadamente el trabajo planteado y que coincide con este primer capítulo descompuesto en los siguientes subcapítulos: contexto y justificación, enfoque y método seguido, planificación, sumario del producto obtenido y descripción de los capítulos de la memoria.

- Segundo bloque:

Bloque fundamentalmente teórico en el que se desarrollan los diferentes servicios basados en comunicaciones inalámbricas existentes en la industria de los ferrocarriles suburbanos, se plantea la problemática de la propagación de las señales radio en túneles y se exponen las soluciones tecnológicas disponibles en el mercado actual. Este segundo bloque abarca los capítulos 2, 3 y 4 del trabajo (servicios de comunicaciones en el entorno ferroviario suburbano, la propagación de las señales radio en los túneles y tecnologías inalámbricas disponibles).

- Tercer bloque:

Bloque en el que se plantea una estrategia práctica de diseño de una red TTBA y el que se obtendrá una metodología a seguir para la realización de escenarios prácticos. Este tercer bloque es coincidente con el capítulo 5 del trabajo.

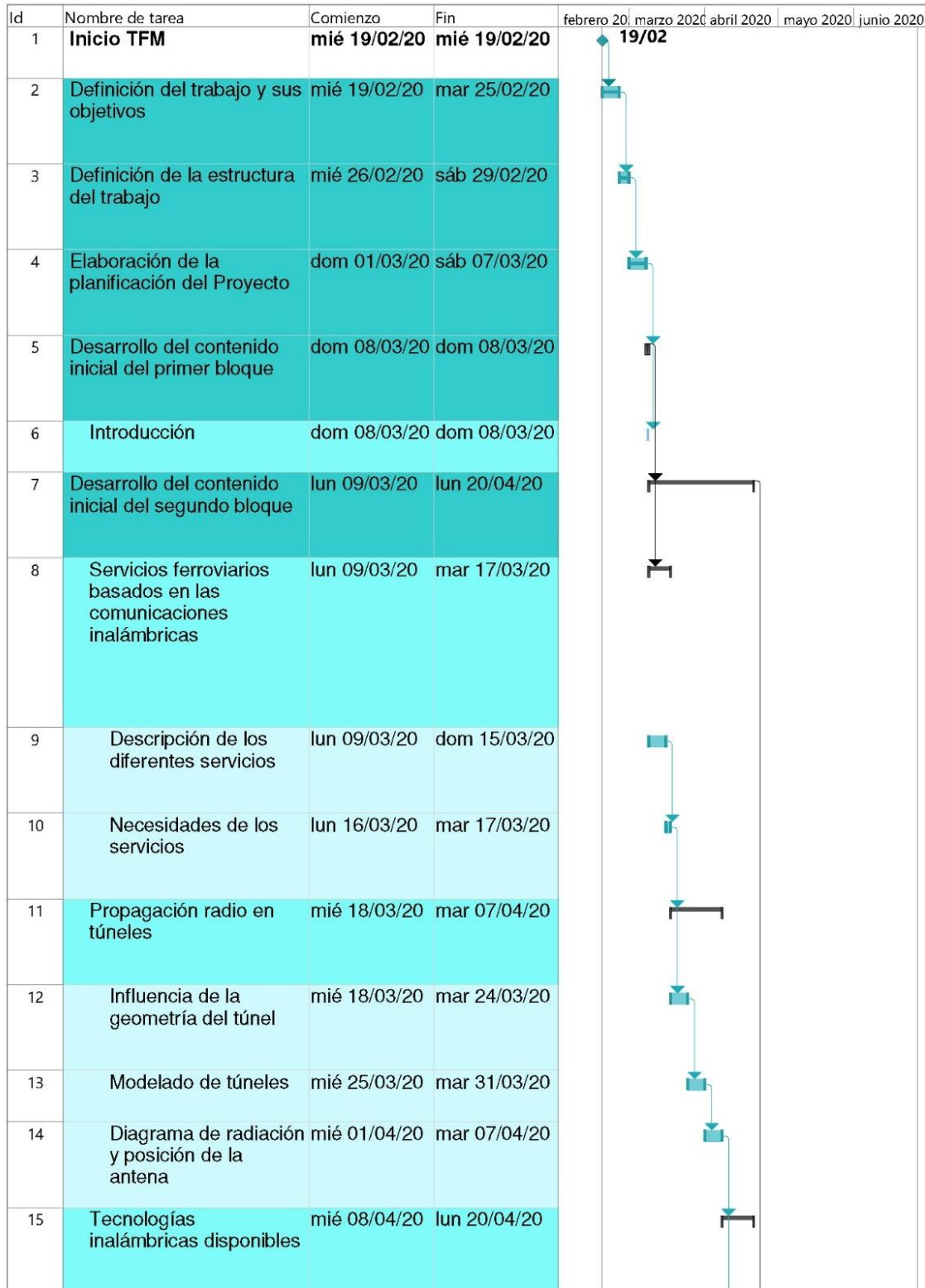
- Cuarto bloque:

Se exponen las conclusiones del trabajo efectuado (capítulo 6).

Gracias a la estructura planteada, se pretende la consecución de un trabajo claro, organizado y con aportaciones teóricas suficientes para materializar los conocimientos adquiridos en un contexto práctico.

1.4 Planificación del Trabajo

La planificación de tareas del trabajo, con su correspondiente referencia temporal, se ha estructurado atendiendo a los cuatro bloques expuestos en el apartado anterior. A su vez, dichas tareas se han desglosado en subtareas. Todo el conjunto de tareas y subtareas identificadas, se representa a través del siguiente diagrama de Gantt:



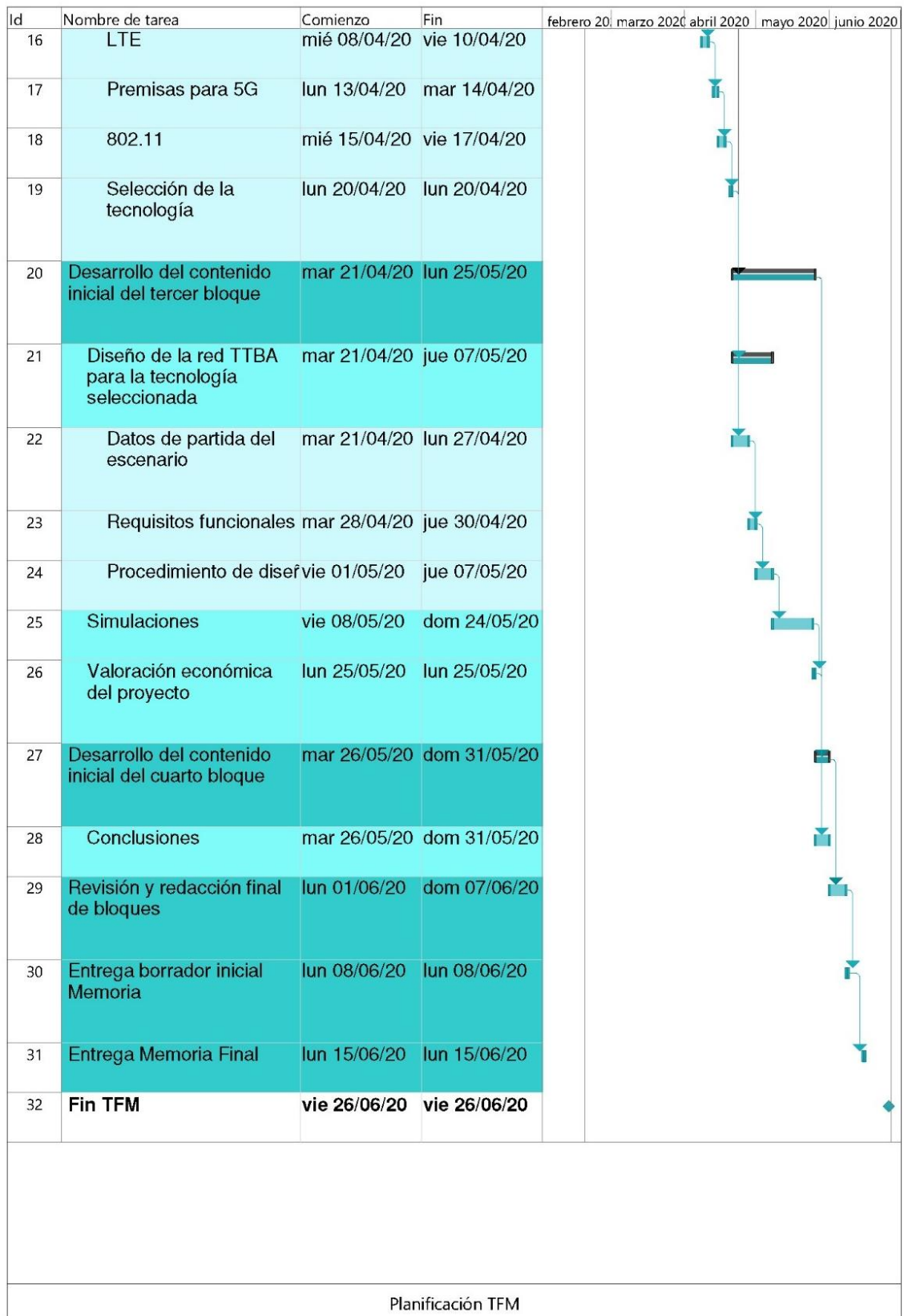







Figura 1. Planificación de tareas y subtareas del trabajo

1.5 Breve resumen del producto obtenido

El resultado de este proyecto es sentar las bases del diseño para realizar un despliegue de red TTBA en una infraestructura ferroviaria suburbana. Para ello, se analizará en profundidad cuál es la tecnología inalámbrica que resulta la mejor solución posible: se procederá a seleccionar una tecnología entre las distintas propuestas y se aplicará a un escenario práctico.

1.6 Breve descripción de los capítulos de la memoria

En la siguiente tabla, se resume de forma concisa el contenido que abarca cada uno de los capítulos desarrollados en este trabajo:

CAPÍTULO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS
<p>CAPÍTULO 1</p>  <p>INTRODUCCION</p>	<p>En el capítulo 1 se contextualiza y se justifica la realización de este trabajo. A continuación, se detallan los objetivos que se persiguen y se presenta una planificación acorde a los objetivos planteados.</p>
<p>CAPÍTULO 2</p> <p>SERVICIOS DE COMUNICACIONES EN EL ENTORNO FERROVIARIO SUBURBANO</p> 	<p>En el capítulo 2 se realiza una descripción de todos los parámetros de diseño que van a caracterizar y definir este trabajo: la principal necesidad del sistema TTBA reside en prestar servicios del tren relacionados con la seguridad, con la telemetría y la operación ferroviaria y con los servicios orientados al cliente.</p>
<p>CAPÍTULO 3</p> <p>LA PROPAGACIÓN DE LAS SEÑALES RADIO EN LOS TÚNELES</p> 	<p>En el capítulo 3 se plantean las principales problemáticas existentes en cuanto a la propagación de las señales radio en un ambiente hostil como son los túneles ferroviarios.</p>
<p>CAPÍTULO 4</p> <p>TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS DISPONIBLES</p> 	<p>En el capítulo 4 se exponen las principales tecnologías inalámbricas disponibles en el mercado que posibilitarán el soporte del sistema de comunicaciones TTBA que se pretende desplegar.</p>
<p>CAPÍTULO 5</p> <p>DISEÑO DE LA RED TTBA PARA LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA</p> 	<p>En el capítulo 5 se presenta el escenario práctico de aplicación: todos los conocimientos teóricos expuestos en los capítulos anteriores se trasladan al ámbito pragmático. Se detallan asimismo los criterios que deben considerarse a la hora de poner en marcha un sistema TTBA en un caso real y se presupuesta el coste de la inversión necesaria para un proyecto de estas características.</p>





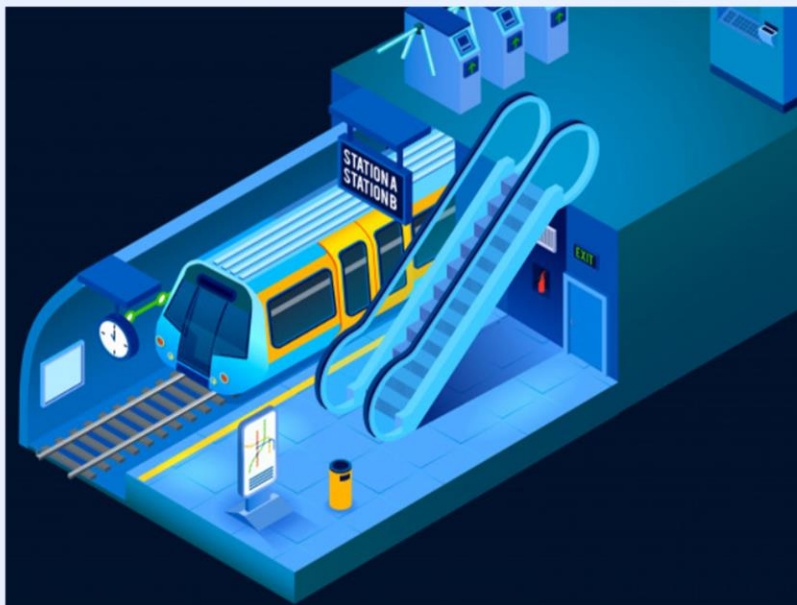
CAPÍTULO	DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS
<p>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES</p> 	<p>En el capítulo 6 se ofrecen las conclusiones alcanzadas tras la confección de todo el trabajo y se esbozan las principales líneas de trabajo a desarrollar en el futuro.</p>
<p>CAPÍTULO 7 GLOSARIO</p> 	<p>En el capítulo 7 se elabora un listado con los acrónimos empleados a lo largo del trabajo para facilitar la comprensión de este.</p>
<p>CAPÍTULO 8 BIBLIOGRAFÍA</p> 	<p>En el capítulo 8 se incluyen todas las referencias bibliográficas que han sido necesarias consultar para la elaboración y presentación de este trabajo.</p>
<p>CAPÍTULO 9 ANEXOS</p> 	<p>En el capítulo 9 se anexa el enlace al manual de usuario de la herramienta <i>Ekahau</i> y una guía rápida explicativa sobre los diferentes módulos que integran el programa.</p>

Tabla 1. Descripción de los capítulos del trabajo

CAPÍTULO 2

SERVICIOS DE COMUNICACIONES EN EL ENTORNO FERROVIARIO SUBURBANO



2. Servicios de comunicaciones en el entorno ferroviario suburbano

Debido al desarrollo incesante de las tecnologías inalámbricas y al aumento de la demanda del transporte suburbano por parte de los clientes, los servicios ofrecidos en este sector, han crecido de forma significativa: ya no solo se centran en cubrir aspectos relacionados con la operativa y con el movimiento seguro del tren, sino que, además, se incorporan servicios para mejorar la experiencia del cliente a bordo de los trenes.

Con el objeto de conocer los diferentes servicios que se van a ofrecer, se va a proceder a establecer una clasificación de estos atendiendo al tipo de necesidad que cubre cada uno de ellos.

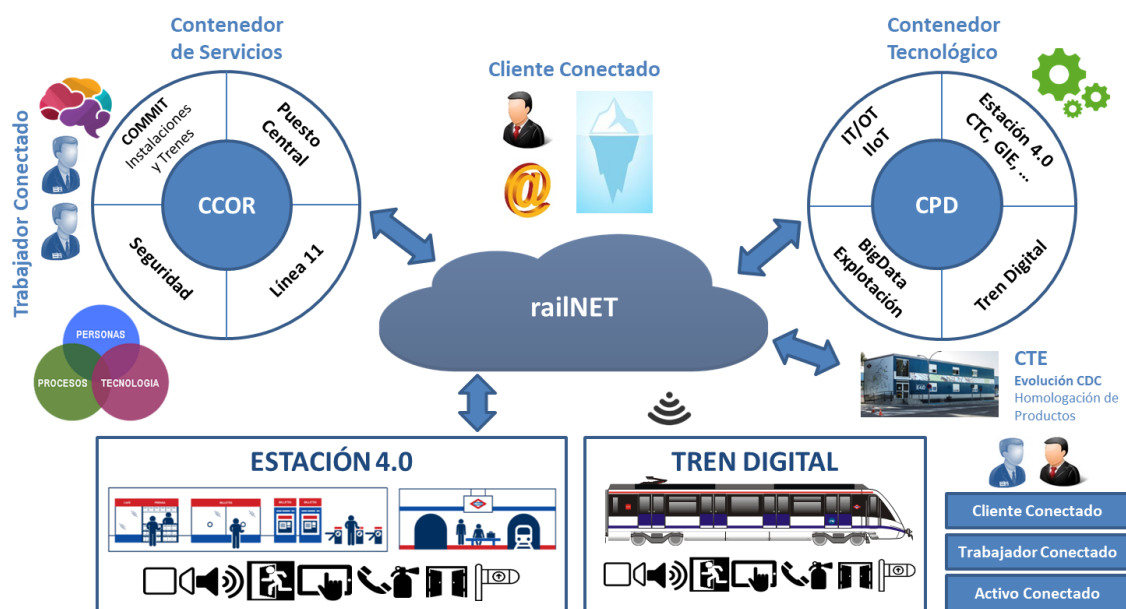


Figura 2. Modelo de interacción de proyectos estratégicos de Metro de Madrid [1]

2.1 Servicios críticos

Este grupo de servicios está compuesto por todos aquellos relacionados con la seguridad y el movimiento del tren.

En lo que respecta a los sistemas de comunicación de seguridad pública, indicar que, aunque no controlan ningún movimiento relacionado con la seguridad del tren, sí proporcionan un canal de comunicación seguro, que permite a los distintos agentes ferroviarios, establecer vías de comunicación rápidas y seguras. En este sentido, se considera a la radiotelefonía de trenes como el principal servicio crítico de voz.

Son numerosas las tecnologías existentes para las radios de seguridad pública: TETRA o GSM-R. No obstante, se propone la tecnología VoIP, por presentar las siguientes ventajas:

- Tecnología que soporta llamadas de voz entre el personal de todas las ubicaciones dentro de todo el sistema de comunicaciones tren-tierra, llamadas de grupo y

llamadas de prioridad; simplemente con pulsar un botón en función del tipo de llamada que se quiera establecer.

- Capacidad para establecer las llamadas en un tiempo muy corto.
- Flexibilidad a la hora de integrar sistemas de comunicaciones de voz, ya sea para nuevos despliegues ferroviarios suburbanos o en reacondicionamiento de los ya existentes.
- Integra QoS extremo a extremo, prestando un servicio adecuado en tiempo real del tráfico de voz en toda la infraestructura de la red.

Parámetro	Requisito
Capacidad	64 kbps (depende del <i>codec</i>)
Retardo (extremo a extremo)	< 150 ms
Jitter máximo	30 ms

Tabla 2. Requisitos para la transmisión de la voz

El movimiento seguro del tren está directamente vinculado con el sistema de señalización ferroviaria. *“La señalización ferroviaria, entendiendo como tal la localización segura de los trenes, la semaforización y el mando de los aparatos de vía, se basa en los siguientes principios fundamentales:*

- *Proporcionar movimientos seguros a través de la red del ferrocarril, manteniendo distancias de seguridad entre trenes apropiadas a las características de la conducción, sistemas de protección y resto de condicionantes de trazado y aparatos de vía.*
- *Facilitar movimientos eficaces de los trenes y proporcionar suficiente capacidad de transporte”.* [2]

La tendencia en señalización ferroviaria es ir dotando de mayor complejidad al equipamiento embarcado del tren e ir suprimiendo poco a poco, el equipamiento localizado en la vía. Este hecho conlleva a un aumento en cuanto a la exigencia de las prestaciones por parte del sistema de radiocomunicaciones tren-tierra, que pasa a responsabilizarse de la transmisión de un volumen de datos críticos que antes se cursaba a través de distintos canales.

Por su importancia en las infraestructuras de transporte metropolitano, se describe a continuación, el sistema CBTC.

2.1.1 Sistema de señalización CBTC

La definición, según IEEE 1414.1, para el sistema CBTC (*Communications-Based Train Control*), es la siguiente: *“Sistema de control automático de trenes basado en la localización continua del tren independientemente de los circuitos de vía, y equipado con un sistema de transmisión bidireccional continuo entre tren y tierra, así como procesadores tanto embarcados como en vía capaces de implementar funciones vitales”* [3].

Valiéndose por tanto de un sistema CBTC, la posición de cada tren sobre una línea de metro concreta es conocida con mayor exactitud que con otros sistemas y, además, la

distancia entre trenes se puede reducir sin comprometer la seguridad (basado en el concepto de “cantón móvil”):

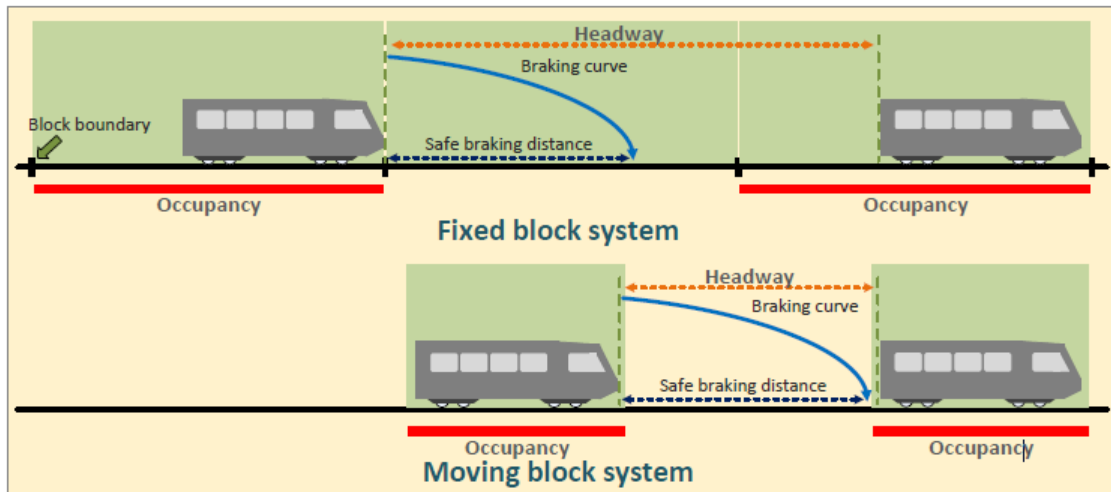


Figura 3. Cantón fijo vs. cantón móvil [4]

Su funcionamiento se basa en que el tren, actualiza constantemente su posición y su velocidad y la va transmitiendo al equipamiento de vía. Así, es posible conocer la zona que ocupa el tren y calcular ciertos puntos que no podrían ser sobrepasados por el resto de trenes que circulan por la vía. Todos los trenes de la misma vía reciben estos datos y reajustan su propia velocidad de manera automática para garantizar una distancia adecuada. Dado que se trata de una información crítica, debe garantizarse su transmisión y recepción en un tiempo razonablemente corto, de lo contrario, dicha información carecería de utilidad. De esta manera, si un tren experimenta algún tipo de dificultad y se ve incapacitado para recibir la autoridad de movimiento o de transmitir su propia posición, se detendrá de forma forzada.



Figura 4. Equipamiento de vía y a bordo del tren en un sistema CBTC [5]

Entendiendo este esquema que se ha simplificado al máximo, se puede pasar a analizar cuáles son los requisitos del subsistema de comunicaciones que debe dar soporte a este servicio: debe ser un subsistema robusto, con capacidad de respuesta incluso si alguno de los elementos que lo compone falla. Por lo tanto, se precisa de un subsistema redundado en lo que respecta a la red de comunicaciones, con caminos alternativos para los cableados, estaciones base duplicadas, *switches*, *routers* y fuentes de alimentación. En cuanto a las comunicaciones inalámbricas, se requiere de una cobertura de doble capa.

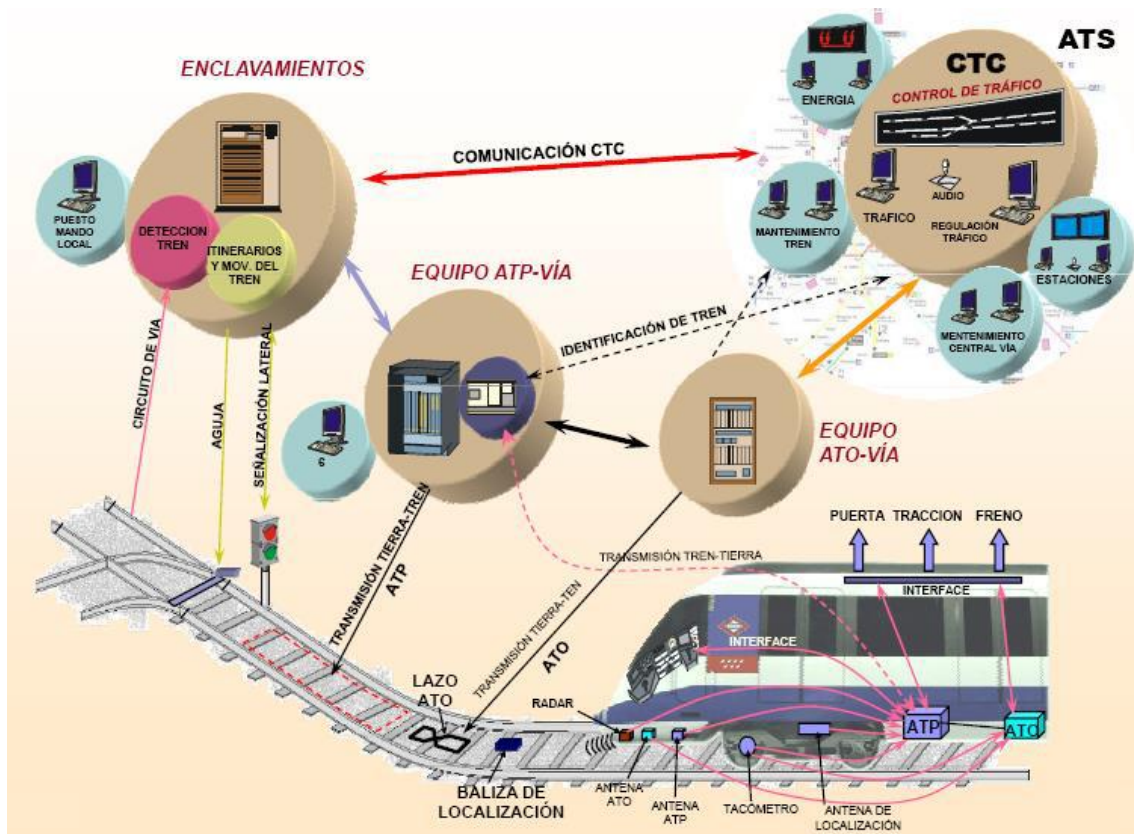


Figura 5. Comunicación tren-tierra en el sistema de señalización CBTC [6]

El tamaño típico de un mensaje de control CBTC ocupa entre 400 a 500 *bytes* y se transmiten cada 100 a 600 ms. Por lo tanto, la velocidad de datos agregada para un sistema CBTC, está típicamente en el rango de 20-40 kbps [4], cifra que puede ser alcanzada por casi todos los sistemas inalámbricos de última generación.

Los requisitos QoS de un sistema CBTC, consisten en un porcentaje del 0% de pérdida de paquetes, un retardo inferior a los 100 ms y un *jitter* cuyo valor promedio no supere los 0.1 ms.

Parámetro	Requisito
Capacidad	20-40 kbps
Pérdida de paquetes	0%
Latencia	< 100 ms
Jitter (valor promedio)	< 0.1 ms

Tabla 3. Requisitos CBTC de la red radio

2.2 Servicios no críticos orientados a la operativa del tren

Este subconjunto de servicios no se considera crítico desde el punto de vista de la seguridad, sino que está relacionado con la operativa, la explotación y el mantenimiento de los trenes. Son servicios que se prestan para llevar a cabo la entrega de información a los clientes (mensajes multimedia anunciando la proximidad de la siguiente estación), el reporte de la telemetría del tren y se incluye también en este subconjunto, el CCTV (circuito cerrado de televisión).

A continuación, se describe brevemente y se presentan los requisitos de cada uno de los servicios no críticos orientados a la operativa del tren.

El sistema de información al viajero permite que, a través de la gestión en tiempo real de la información, se pueda ofrecer al cliente un espectro completo de paneles embarcados con información corporativa o comercial. A su vez, toda la información difundida de forma visual puede tener un reflejo acústico en los sistemas de megafonía facilitando definir la emisión de la información en zonas concretas del tren o en su totalidad.

<i>Parámetro</i>	<i>Requisito</i>
Capacidad	500 kbps (por tren)
Retardo (extremo a extremo)	< 150 ms

Tabla 4. Requisitos de la red radio para el sistema de Información al viajero

La arquitectura del sistema que origina la transmisión de la telemetría de un tren, se compone de distintas capas que permiten capturar, transportar, almacenar, procesar y analizar los datos generados por distintos componentes embarcados. A través de la transmisión de la telemetría del tren, se permite concentrar y procesar información embarcada para ponerla a disposición de los servidores de tierra a través de los canales de comunicaciones inalámbricos adecuados, haciendo posible la monitorización de todas las señales del tren, el envío de forma automática de las alarmas críticas del tren a tierra y el procesamiento y la descarga de forma automática de los históricos almacenados.

<i>Parámetro</i>	<i>Requisito</i>
Capacidad	200 kbps
Retardo	< 100 ms
Pérdida de paquetes	0%

Tabla 5. Requisitos de la red radio para la telemetría del tren

El sistema de videovigilancia embarcado (CCTV) posibilita una transmisión tren-tierra bidireccional en los siguientes sentidos:

- Transmisión de tierra a tren para la conmutación de las cámaras de andén.
- Transmisión de tren a tierra para la visualización de las cámaras de tren en distintos puestos de seguridad desplegados en distintas estaciones.

Además, otros servicios contemplados en este sistema son la monitorización y transmisión de la información recogida y la transmisión de vídeo entretenimiento embarcado para los clientes.

Los elementos que componen el sistema de vídeo embarcado son los siguientes:

- Sistema central: constituye el repositorio central de la información de la actividad de los trenes, permite procesos de consolidación y distribución de la información procedente de los distintos servidores de línea y alberga el servidor Web de aplicaciones centrales.
- Sistema por línea: permite la integración con otros sistemas para obtener información de actividad de trenes de la línea, el traspaso bidireccional de información con los trenes que circulan por la línea y los procesos de comunicación bidireccional con el sistema central.

- Sistema por estación: permite los procesos de comunicación bidireccional con los trenes que circulan por la línea para facilitarle el vídeo de las cámaras de andén de la estación.

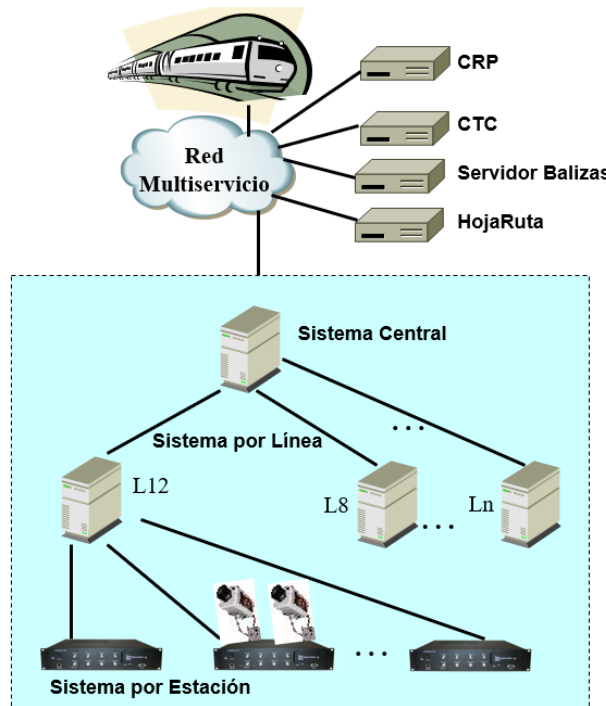


Figura 6. Elementos del sistema de vídeo embarcado

Parámetro	Requisito
Capacidad	De 2 a 15 Mbps por cámara (estándar MPEG)
Retardo	< 150 ms
Jitter	< 20 ms

Tabla 6. Requisitos de la red radio para CCTV

2.3 Servicios no críticos orientados a mejorar la experiencia de los clientes

Los servicios orientados a los pasajeros requieren de un buen diseño de la red para adaptarse a las características de la movilidad de la voz y de los datos. Se trata en cualquier caso de servicios suplementarios que no conllevan exigencia alguna en términos de disponibilidad de la red. La descarga de vídeos y ficheros, el juego *online*, el tráfico de VoIP y el acceso a Internet, son solo algunos ejemplos de este subconjunto de servicios.

Las dificultades que pueden surgir a la hora de prestar este tipo de servicios radican en las siguientes consideraciones:

- Necesidad de equipar el tren con dispositivos a bordo que quedarán expuestos a factores ambientales severos (temperatura, humedad), a campos magnéticos elevados (por la presencia de altas tensiones y corrientes), a fuertes vibraciones propias del entorno ferroviario suburbano. En definitiva, todo equipamiento

embarcado debe cumplir la normativa EN 50155 para aplicaciones ferroviarias (Equipos electrónicos utilizados sobre el material rodante).

- Pérdida de penetración del vehículo (depende de la frecuencia de la señal y del tipo de vehículo).
- Igual suerte corre todo el equipamiento de vía, que, en este caso, debe cumplir la normativa EN 50121- 5 para aplicaciones ferroviarias (Compatibilidad electromagnética: Emisión e inmunidad de las instalaciones fijas de suministro de energía y de los equipos asociados).
- Problemática de la ciberseguridad: manejar en una misma red datos de los clientes de a bordo y datos relativos a la seguridad del tren, conlleva problemas de seguridad, aunque lógicamente cada servicio se enrutaría por una subred distinta, dependiendo de la prioridad.

En el caso de Metro de Madrid, y gracias a la empresa Metrocall (encargada de ofrecer cobertura de telefonía móvil en la red), *“en el año 2005 se alcanzó un acuerdo con las tres empresas de telefonía móvil que operaban en España para ofrecer el servicio en el interior del Metro, estipulando que la cobertura debería ser multibanda y multiservicio”* [7].

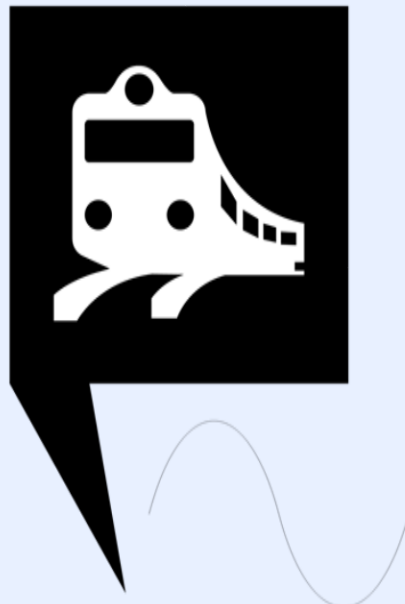
A lo largo del presente año 2020 (se espera que a partir de septiembre), Metro de Madrid tendrá acceso a cobertura 4G en toda la red y, por lo tanto, todo este subconjunto de servicios recaerá sobre este despliegue, no siendo necesario contemplarlo en el diseño de la red TTBA.



Ilustración 1. Tecnología LTE en Metro de Madrid [8]

CAPÍTULO 3

LA PROPAGACIÓN DE LAS SEÑALES RADIO EN LOS TÚNELES



3. La propagación de las señales radio en túneles

En este capítulo se va a realizar un estudio de los fenómenos presentes en el ámbito de la propagación de la señal radio en entornos ferroviarios suburbanos. Existen dos casos radicalmente diferentes en este sentido: los túneles y los trazados que discurren por exteriores.

3.1 Modelos de propagación en túneles

Las explotaciones ferroviarias metropolitanas comenzaron a desplegar sistemas de radiotelefonía en sus trenes y estaciones a finales de los años 70. El estado de esta tecnología apenas ha sufrido alteraciones hasta principios de este siglo, cuando surge la necesidad de adoptar sistemas de banda ancha. Los principales problemas presentes en las condiciones de propagación de las señales radio en los túneles ferroviarios, van desde problemas enteramente físicos, hasta particularidades intrínsecas de cada explotación ferroviaria. Los trazados de cada infraestructura pueden llegar a ser tremendamente complejos: existen túneles de distinta naturaleza (cambios de sección en túneles, presencia de columnas, vanos, existencia de apartaderos, estaciones construidas con criterios ampliamente heterogéneos, etc.).

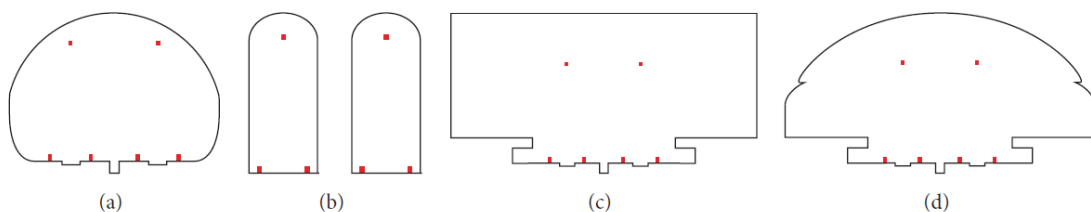


Figura 7. Secciones típicas de un túnel [9]

La sección transversal del túnel impacta directamente sobre la atenuación. En la figura anterior, se muestran las secciones más típicas de los túneles. La influencia de la sección transversal en la atenuación, varía al aumentar la frecuencia.

Está comprobado que, al modificar la altura del túnel, el efecto en el modo de polarización vertical aumenta, mientras que la anchura incide sobre el modo de polarización horizontal. Las curvas presentes en los túneles pueden llegar a impedir la línea de visión directa (LOS) entre el transmisor y el receptor, impactando en la propagación de la señal radio. La dispersión del retardo de la señal radio aumenta y la potencia de la señal decremента al aumentar el radio de la curva. En túneles rectos, la atenuación disminuye al aumentar la frecuencia, mientras que, en los túneles en curva, aumenta [10].

Algunas de las peculiaridades que centran el estudio del modelado de túneles y de los factores que intervienen en la propagación por su interior, son: la frecuencia de la señal, las dimensiones del túnel, las propiedades electromagnéticas de las paredes y los obstáculos. Se debe considerar que en las instalaciones ferroviarias conviven equipos

de comunicaciones con la catenaria del tren, con la vía, con armarios de equipamiento y con los propios trenes.

Es imprescindible resaltar que en el túnel predomina un fuerte componente multirrayecto. La causa que origina este hecho es la presencia de constantes reflexiones de la señal en las paredes del túnel, vías, catenaria y armarios. De teoría de la señal, se deduce que el multirrayecto puede producir desvanecimientos.

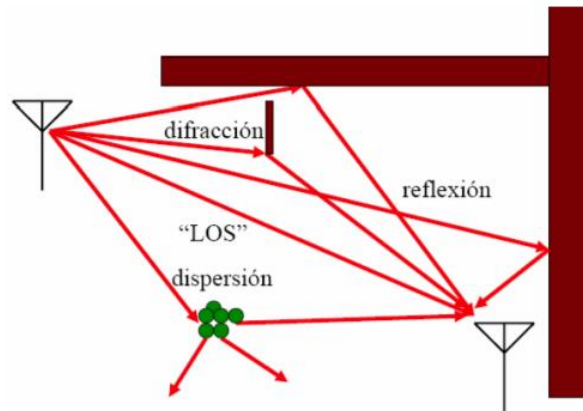


Figura 8. Fenómenos físicos presentes en un canal radio [11]

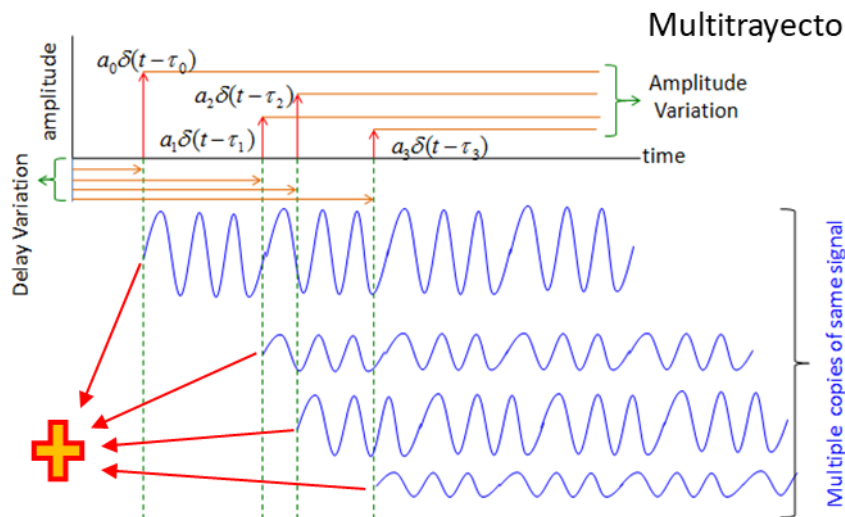


Figura 9. Fenómeno causado por el multirrayecto

Adicionalmente, los trenes, son a todos los efectos, grandes superficies metálicas en movimiento que dificultan la recepción correcta de la señal. Esto puede llegar a suponer un verdadero hándicap para los elementos radiantes, cuya ubicación, cobra una relevancia notable.

Para abordar la propagación de la señal radio en túneles, se propone seguir alguna de las tres metodologías siguientes:

- Metodología basada en la teoría modal: es aquella en la que el túnel es considerado como una guía de onda.
- Metodología que se apoya en la óptica geométrica y en el trazado de rayos.
- Métodos híbridos, que combinan los dos métodos anteriores e introducen correcciones experimentales.

A continuación, se introducen los fundamentos de los dos primeros modelos, para comprender el enfoque propuesto por cada uno de ellos.

3.1.1 Método basado en la teoría modal

En este tipo de métodos, toda señal que se propaga por el interior del túnel, se puede fragmentar en diversos modos de propagación que dependerán de la excitación y de la forma del túnel, entre otros factores. Así, el túnel se considera como una guía de onda y de esta forma, una de las condiciones que se debe cumplir es que la frecuencia de la señal radio ha de superar a la frecuencia de corte de la guía, lo que se traduce en que la sección del túnel debe ser mucho mayor que la longitud de onda.

Sea a el radio de túnel (considerándolo circular); para modelar el túnel, se deben cumplir las dos siguientes expresiones:

$$a \gg \lambda$$

$$f_0 > f_c$$

Los modos de propagación resultantes dependerán de la excitación de la señal y la atenuación, variará según el modo del que se trate. Otro factor que interviene por ejemplo en la proliferación de desvanecimientos rápidos es que, de todos los modos, cada uno presenta una atenuación distinta, por lo que se van a observar rápidas variaciones en el campo según el avance axial de la señal (perpendicular a la sección del túnel).

	n=1	n=2	n=3
m=1	4.6dB	17dB	38dB
m=2	6dB	18dB	40dB
m=3	8dB	21dB	42dB

F = 2.4 GHz.

	N=1	N=2	N=3
M=1	0.2dB	0.8dB	1.8dB
M=2	0.3dB	0.9dB	1.9dB
M=3	0.4dB	1dB	2dB

F = 10 GHz

Tabla 7. Atenuación de los modos híbridos EH a 2.4 y a 10 GHz [12]

El caso más fácil de abordar se corresponde con el de un túnel de sección circular; para los túneles rectangulares compuestos por paredes con pérdidas, no existe ninguna expresión exacta que permita hallar el campo eléctrico [12]. En la actualidad, debido al uso extendido de las tuneladoras para la construcción de túneles, lo más habitual es encontrar túneles circulares. La principal conclusión que se extrae del artículo referenciado en [12], es que se puede pensar en una clara división existente en los túneles: fundamentalmente, son dos las zonas que presentan distintas variaciones de la atenuación en función de la distancia y diferentes desvanecimientos detectados en el receptor. Además, cuanto mayor sección presente el túnel y más alta sea la frecuencia de la señal, menor atenuación se obtiene.



Ilustración 2. Ampliación de Línea 11 con tuneladora [13]

Se trata de un método muy adecuado siempre y cuando la forma del túnel presente cierta simplicidad. Por lo tanto, es necesario recurrir a modelos que consideren la complejidad de los túneles reales, tanto en lo referente a su sección, como en las propias paredes del túnel, puesto que los trazados antiguos se ajustan a este tipo de características.

3.1.2 Método basado en la óptica geométrica y en el trazado de rayos

Este método consiste en la determinación de los rayos existentes entre transmisor y receptor. Para ello, se recurre a las leyes de la transmisión y reflexión para determinar la influencia que cada rayo independiente, ejerce sobre el receptor.

Aparte de la óptica geométrica, se debe considerar el fenómeno de la difracción, contemplando la teoría general de la difracción. El coste computacional derivado es un aspecto a tener en cuenta, ya que los cálculos a realizar son muy elevados y los datos de entrada muy voluminosos.

Un enfoque bastante aceptado consiste en considerar el fenómeno de la difracción solo en caso de que exista un cambio de sección en el túnel.

La parametrización que emplea este modelo incluye el total de rayos a considerar, la cantidad de obstáculos en el camino (vanos, armarios, vías, catenaria) y la dispersión de los rayos en función de la rugosidad de la superficie. Considerando todos estos factores, se constata la existencia de dos zonas [14]:

- Cercana al transmisor, con variaciones muy rápidas de la señal en el receptor que producen desvanecimientos rápidos.

- Alejada del transmisor, donde los rayos que llegan al receptor están muy atenuados y los desvanecimientos que se observan, son muy lentos.

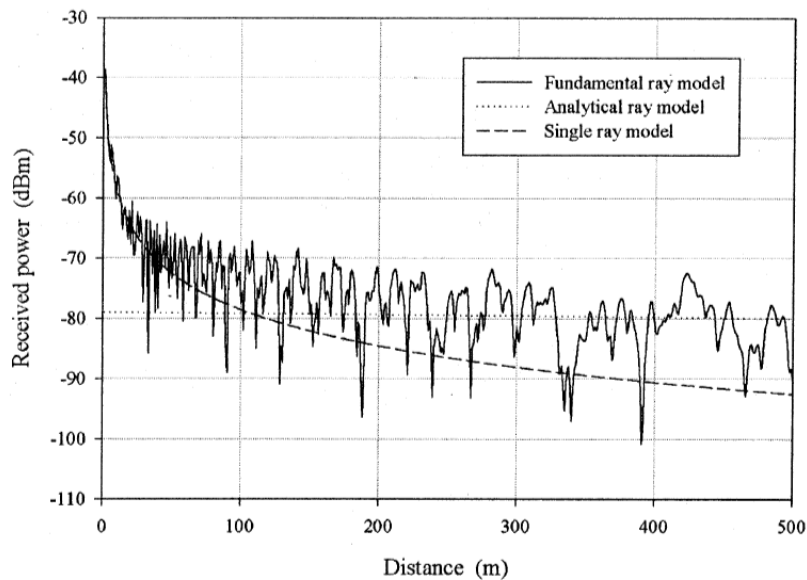


Figura 10. Simulaciones del modelo de la teoría de rayos propuestos en [15]

BP Locations Tunnels	Measured Break Point (m)	Calculated Break Point (m)	Estimated Break Point (m)
Coal Mine Tunnel 900 MHz	40	40	29
Road Tunnel 900 MHz		150	31
Potash Mine Tunnel 915 MHz [14]	40	40	22
Arched Subway Tunnel 945 MHz 1.853 GHz [15]	68 120	60 110	46 89
Rectangular Subway Tunnel 1.853 GHz [15]		75	80
Railroad Tunnel 1800 MHz	178	193	310
Coal Mine Tunnel 2.448 GHz [16]	45	50	59

Tabla 8. Tamaño de microceldas en túneles según [15]

3.1.3 Conclusiones del estudio teórico de la propagación en túneles

Las principales conclusiones que se obtienen de los distintos estudios teóricos efectuados sobre la propagación de la señal en túneles, son las que se listan a continuación:

- Ni la permitividad ni la conductividad de las paredes que conforman los túneles, tienen un verdadero impacto sobre la propagación.

- A mayor sección del túnel y conforme se aumenta la frecuencia, disminuye la atenuación.
- Tanto el trazado del túnel (las curvas pueden llegar a impedir la LOS entre transmisor y receptor), como la forma y la sección de este, influyen de forma muy significativa en la propagación.
- Existen muchos elementos que dificultan la propagación de la señal: armarios, catenaria, la vía y las posibles ramificaciones.

3.2 Diagrama de radiación y posición de la antena

La propagación de las señales radio en el interior del túnel depende de la posición, polarización y del diagrama de radiación de las antenas transmisoras y receptoras [12].

La atenuación que sufre la señal puede reducirse empelando antenas con un diagrama de radiación adecuada en las ubicaciones oportunas: antenas omnidireccionales ofrecen mejor cobertura en regiones del túnel NLOS, mientras que las direccionales funcionan mejor en las regiones LOS.

Además, de debe considerar el impacto que causan los trenes en los túneles: las reflexiones del tren aumentan la dispersión del retardo, se requiere suficiente ancho de banda para que la comunicación sea viable. Cuando el tren se antepone al transmisor, se origina un efecto de sombra cuyo resultado se traduce en una atenuación de la señal que puede llegar a durar varios segundos [12].

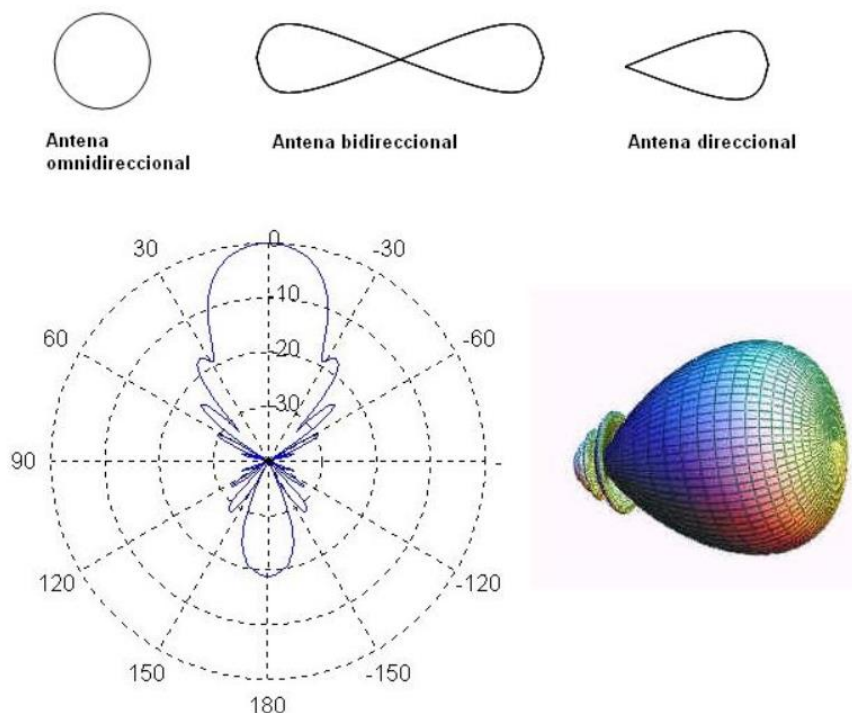


Figura 11. Diagramas de radiación de antenas [16]

3.2.1 Sistemas multiantena

En la actualidad, los sistemas de comunicaciones inalámbricos optan por la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), como ocurre en LTE (desde la *release 8* en adelante), WiMAX o la familia 802.11 (el primero en adoptarlo fue el estándar 802.11n). Es por ello que se convierte en necesidad el hecho de evaluar qué posibilidades ofrece implantar un sistema MIMO para llevar a cabo una comunicación bidireccional de banda ancha entre un tren y tierra.

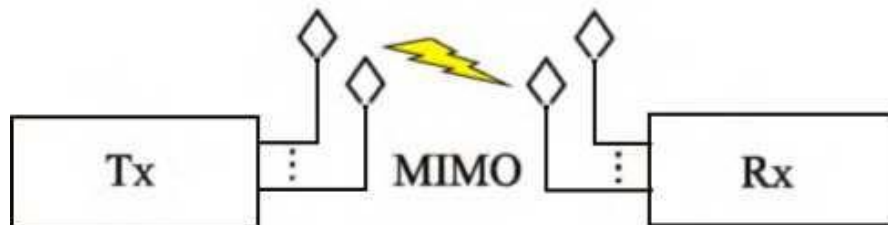


Figura 12. Esquema de un sistema MIMO [17]

Como ya se ha visto en el capítulo 2, las explotaciones ferroviarias necesitan disponer de un número considerable de servicios que precisan de un enlace entre el tren y las instalaciones existentes en tierra. Cada servicio como ya se ha detallado, tiene sus propios requisitos de calidad, y todos ellos en conjunto, demandan un ancho de banda mayor en un entorno hostil para la propagación electromagnética.

MIMO permite obtener tasas de transmisión elevadas, incluso en túneles, ya que uno de los escenarios donde MIMO garantiza su utilidad se da cuando el canal de comunicación presenta un fuerte multitrayecto (túneles).

Con los sistemas multiantena, se obtienen las siguientes ventajas:

- Gracias a la ortogonalidad de los subcanales, se reducen o se eliminan los desvanecimientos, consiguiendo ganancia por diversidad.
- Ganancia de capacidad (o ganancia debida a la multiplexación espacial): se multiplexa la información en varios subcanales independientes entre sí, al dividir espacialmente el canal de comunicación.
- Ganancia de array: a través de la conformación de haces, se permite reforzar o eliminar determinadas direcciones.

CAPÍTULO 4

TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS DISPONIBLES



4. Tecnologías inalámbricas disponibles

En este capítulo se recogen las mejores tecnologías inalámbricas disponibles capaces de dar soporte a todos los servicios que se han mencionado en el capítulo 2.

Una red inalámbrica se define como una conexión entre nodos por medio de ondas electromagnéticas sin necesidad de conexión física, eludiendo así el uso de cables.

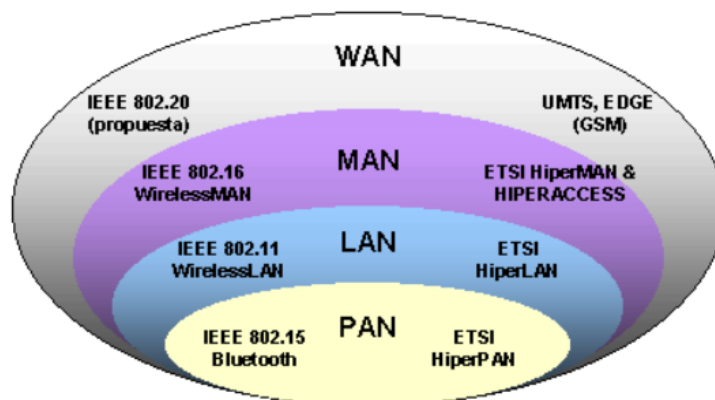


Figura 13. Posicionamiento de estándares *Wireless* [18]

Las redes inalámbricas ofrecen numerosas ventajas, entre las que merece la pena destacar las siguientes [19]:

- Se trata de redes ubicuas. Se permite el acceso a la información desde cualquier punto dentro de la zona de cobertura con cierto grado de movilidad, que depende de la tecnología.
- Redes cuyo despliegue no requiere la realización de grandes obras. Se trata de instalaciones sencillas que se llevan a cabo en un plazo de tiempo muy razonable.
- Son redes flexibles que pueden variar de una configuración a otra de forma ágil.
- Se trata de redes escalables que permiten desplegar una gran cantidad de topologías en las que resulta fácil incorporar a nuevos clientes.

Aunque las ventajas son numerosas, también existen ciertos inconvenientes que conviene considerar:

- Existencia de interferencias intrasistema: no son controlables en caso de existir redes muy próximas que utilicen la misma frecuencia u otras frecuencias cercanas.
- Existencia de interferencias intersistema con otras redes que funcionan en el mismo espectro compartido.
- Potencia de emisión limitada y reducida que provoca una disminución del área de cobertura.
- En determinados casos y dependiendo de la tecnología, presentan un ancho de banda reducido.
- Seguridad limitada. Las portadoras radio pueden llegar a ser accesibles para terceros.

Hoy en día, resulta bastante frecuente encontrar un alto grado de fragmentación tecnológica en las radiocomunicaciones ferroviarias suburbanas: es habitual encontrar

antiguos sistemas analógicos para la radiotelefonía, con sus correspondientes versiones evolucionadas al mundo digital (TETRA o GSM-R), en convivencia con radios de banda ancha de propósito general (basadas generalmente en 3G, 4G, WiMAX e IEEE 802.11a/ac/b/g/n), y con las radios de los sistemas de señalización (CBTC). En un tren al uso, es posible disponer de hasta cuatro sistemas de radio diferentes, lo que conlleva a un coste muy elevado tanto en términos de instalación, como de mantenimiento. La solución tecnológica a este problema, que supone a su vez un desafío cuantioso, apunta hacia la convergencia radio.

Es importante considerar que independientemente de la tecnología que se vaya a seleccionar, un sistema tren-tierra de banda ancha debe ser capaz de transportar datos correspondientes a diferentes servicios, de los cuales, habrá servicios que, por su criticidad, son más prioritarios y, por lo tanto, el sistema que se vaya a implementar debe contemplar políticas de QoS. Por citar un ejemplo claro que no obedece a este modelo, el acceso a Internet en cualquier lugar del planeta, sigue un modelo “*best effort*”, consistente en un tipo de servicio de red en la que propia red no es capaz de ofrecer la garantía de que los datos lleguen a su destino y tampoco ofrece al usuario una determinada QoS en sus comunicaciones [20].

Se abordará por tanto el despliegue de una red por cada tipo de servicio, priorizando a las redes de los servicios más críticos.

4.1 Evolución de las comunicaciones móviles: de 2G a 4G y horizonte hacia 5G

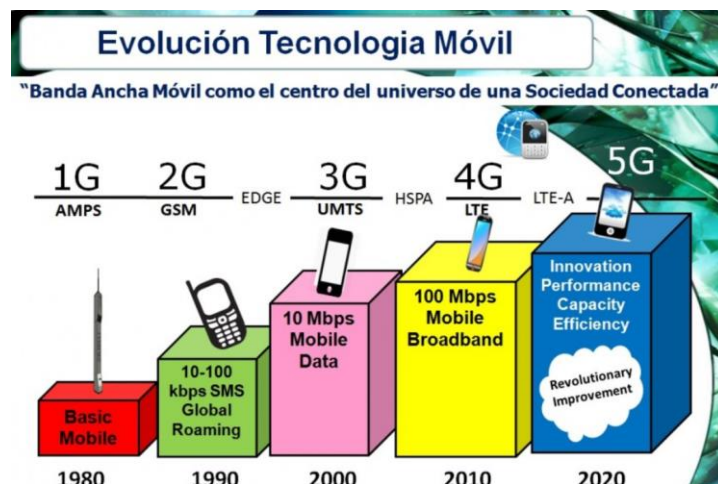


Figura 14. Evolución de la tecnología móvil [21]

Cada día aparecen nuevos avances en el mundo de las tecnologías de las telecomunicaciones. La primera versión de las comunicaciones móviles (1G) es analógica y por lo tanto no se va a ahondar en esta. La segunda generación (2G), que se denomina GSM (*Global System for Mobile Communications*), es una tecnología de naturaleza digital y aunque básicamente su uso reside en la transmisión de voz, se puede utilizar para acceder a Internet a través de una modificación de GSM denominada GPRS (*General Packet Radio System*), que no es más que una extensión de GSM para la transmisión de datos por paquetes y cuya forma habitual de referirse a ella es 2.5G.

Es a partir del estándar 2G, además, que ha sido posible el desarrollo de un sistema de comunicaciones para la explotación ferroviaria llamado GSM-R, sumando al estándar GSM nuevas funcionalidades y especificaciones operacionales definidas exclusivamente para el entorno ferroviario y adoptadas de los proyectos europeos EIRENE (*European Integrated Railway Radio Enhanced Network*) y MORANE (*Mobile Radio for Railways Networks in Europe*). El rasgo fundamental del sistema GSM-R es la necesidad de garantizar el funcionamiento del sistema aun cuando los terminales viajan a velocidades muy superiores a las habituales.

La concepción del sistema GSM-R fue el resultado del esfuerzo considerable realizado por todas las partes intervinientes. Desde su origen, hubo grandes detractores del sistema que alertaban de sus limitaciones y que auguraban su sustitución a medio plazo. Dichas limitaciones se resumen en los siguientes puntos:

- GSM es una tecnología de hace casi tres décadas, con toda la problemática de obsolescencia que esto implica. Por ser una tecnología diseñada para la transmisión de la voz, supone el mantenimiento de los recursos de manera continua entre los extremos de la comunicación.
- Interferencia con las bandas de comunicaciones móviles públicas. En Europa en concreto, al encontrarse las bandas muy próximas entre sí, se agrava el problema.
- Limitaciones tecnológicas importantes: su *bitrate* máximo no serviría para transmitir vídeo, por ejemplo, aunque sí podría dar cobertura a servicios que no requieren tasas de transmisión muy exigentes (CBTC, radiotelefonía).
- Se trata de una tecnología de nicho con una economía de escala muy reducida.

Retomando la red GSM, merece la pena comentar la arquitectura en la que se basa este sistema. Básicamente, son necesarios los siguientes elementos [22]:

- MS: es el terminal móvil.
- SIM: es el módulo que sirve para identificar a cada usuario.
- BTS: es la estación base a la que se conecta un terminal móvil a la red GSM.
- BSC: es el controlador de las estaciones base.
- MSC: es el centro de conmutación que establece y enruta las llamadas dentro de la red GSM y responsable del registro de usuarios, reenvío de SMS y gestión de la movilidad.

Adicionalmente, se requiere la definición de los siguientes interfaces entre los distintos elementos:

- Interfaz U_m : interfaz existente entre el MS y el BSC.
- Interfaz A_{bis} : interfaz existente entre el BSC y la BTS.
- Interfaz A: interfaz existente entre el MSC y el BSC.

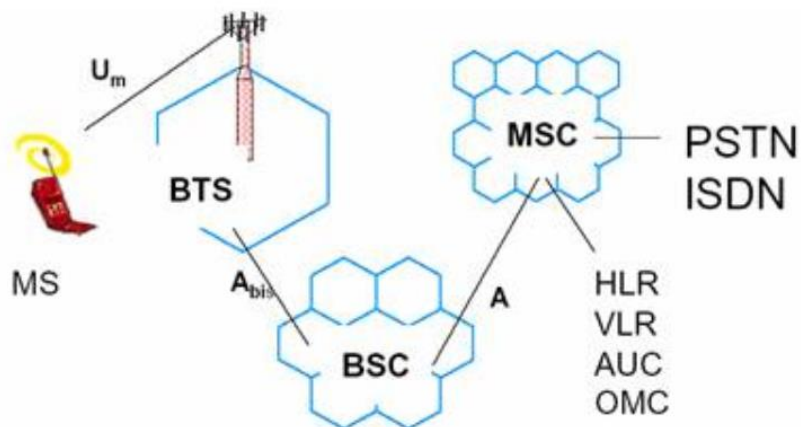


Figura 15. Arquitectura de la red GSM [22]

El subsistema MSC se compone a su vez de varios módulos. De manera muy resumida y esquemática, estos serían:

- VLR (*Visitor Location Register*): base de datos de ubicaciones encargada de actualizar el HLR de forma periódica para obtener la última ubicación del terminal.
- HLR (*Home Location Register*): registra los datos estáticos de los abonados a un operador concreto.
- AUC (*Authentication Center*): realiza funciones de autenticación.
- EIR (*Equipment Identity Center*): valida los equipos utilizados por los suscriptores a través del IMEI (*Identificación Internacional de Equipo Móvil*).

En lo que a la parte radio se refiere GSM 900, usa tanto TDMA como FDMA para el acceso al medio. La canalización empleada es de 200 kHz y el tiempo se divide en unidades básicas de 4.615 ms.

La gran ventaja de GPRS respecto de GSM, es que mientras que GSM reserva recursos hasta que no termine todo el servicio, GPRS solo mantiene información sobre el estado del servicio, permitiendo que el usuario utilice el recurso si se encuentra libre. GPRS, funciona sobre la red GSM, por lo que se puede entender como una extensión de esta hacia la conmutación de paquetes [23]. En GPRS la asignación de *slots* (recursos) acontece de manera más versátil y se emplean, además, codificaciones más eficientes, permitiendo alcanzar tasas más elevadas. En el mejor de los casos, se puede llegar a hablar de 20 kbits/s y por *timeslot*.

GPRS incorpora nuevos elementos con respecto a GSM: la PCU (*Packet Control Unit*), que es la responsable del control del flujo, la asignación de *slots* y el *paging*; SGSN (*Serving GPRS Support Node*), que conecta el core de red con la capa de acceso; y el GGSN (*Gateway GPRS Support Node*), que conecta a GPRS con otras redes de paquetes.

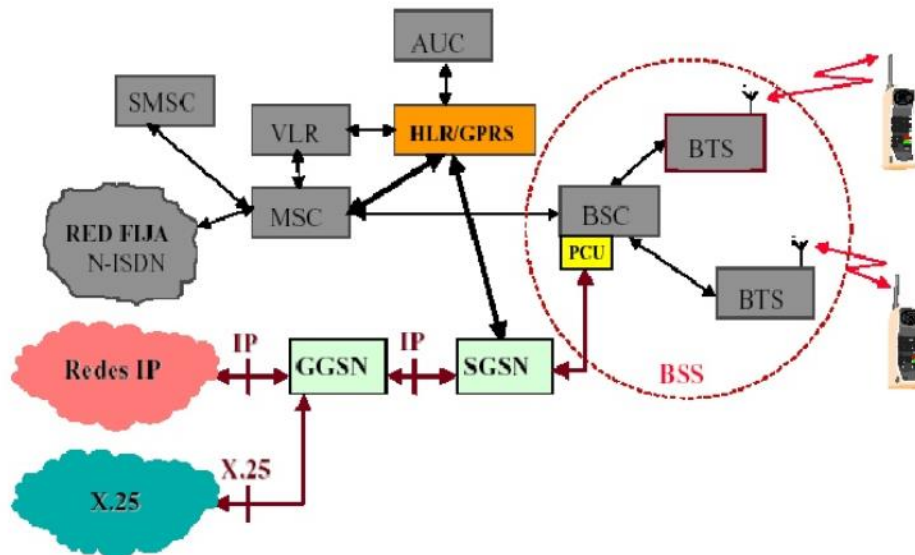


Figura 16. Arquitectura de la red GPRS [24]

A partir de la tecnología GPRS se ha desarrollado la tecnología EDGE o EGPRS, basada en la mejora de la tasa de transmisión de datos. La tecnología EDGE puede llegar a funcionar con altas tasas de transmisión de bits por segundo, por lo que es una alternativa a los estándares de tercera generación.

En la tercera generación, la conmutación de circuitos y la de paquetes se sitúan al mismo nivel de importancia: UMTS supone una evolución considerable con respecto a las tecnologías predecesoras, tanto en la gestión de la movilidad, en el control de la sesión y de la llamada y en la tecnología radio de acceso al medio, WCDMA. WCDMA presenta una mayor eficiencia espectral en ciertos escenarios frente a TDMA. No obstante, no es compatible con GSM. CDMA se basa en una multiplexación por códigos y sigue siendo necesaria una separación entre los usuarios, aunque la limitación ahora viene marcada por la interferencia entre ellos.

La arquitectura funcional de UMTS presenta, por una parte, el acceso radio basado en WCDMA (UTRAN, con sus nodos B), y, por otra, la tradicional de GSM. Adicionalmente, en el core de red existen de nuevo dos partes completamente diferenciadas: la relativa a la conmutación de circuitos y la relativa a la conmutación de paquetes. La entidad RNC se encarga de la planificación y los trasposos; MSC se responsabiliza de la gestión de las conexiones en el plano de la conmutación de circuitos, de la gestión de la movilidad, del *paging* y de la seguridad; los nodos GMSC y GGSN se responsabilizan de las conexiones con las redes externas; y SGSN se responsabiliza del nexo entre el core de la red de paquetes con la red de acceso al medio.

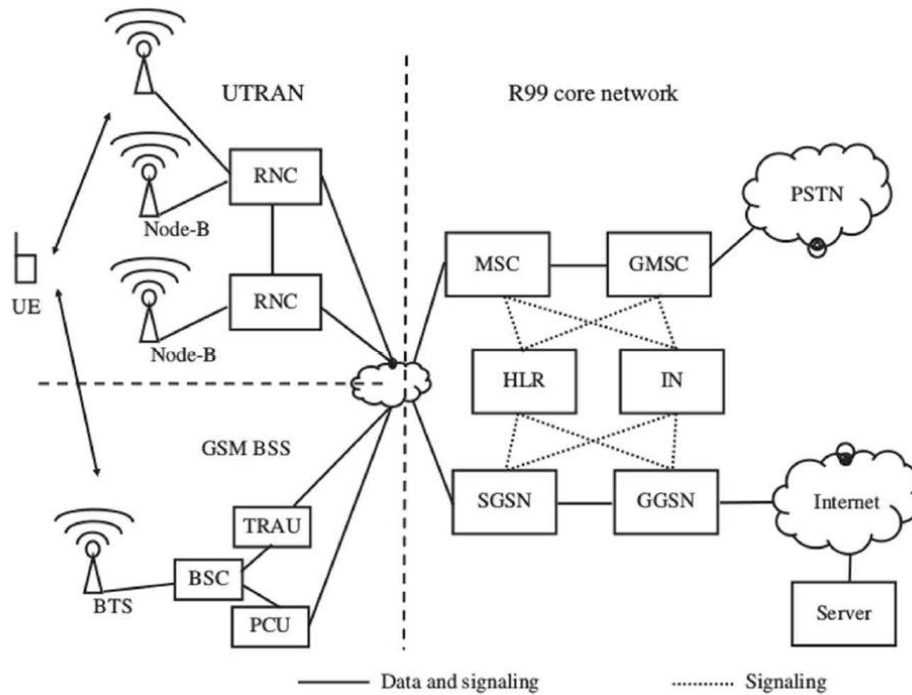


Figura 17. Arquitectura de la red UMTS [25]

A pesar de las mejoras aportadas por UMTS, la evolución de los servicios de telecomunicaciones, demanda velocidades de transmisión cada vez mayores, que los sistemas 3G no soportan. Para cubrir esta demanda, surgen los sistemas de cuarta generación (4G).

La especificación de los requisitos a cumplir por un estándar 4G, se realiza por la ITU en el año 2008. Esta especificación se conoce como IMT-A (*International Mobile Telecommunications -Advanced*) y consiste en un conjunto de requisitos que marca la hoja de ruta a seguir por las arquitecturas de comunicaciones móviles de cuarta generación. Estos requisitos se resumen en: velocidad de transmisión mínima de 100 Mbps en el enlace de *downlink* y 40 Mbps en el enlace de *uplink*, en un ancho de banda de 20 MHz.

El exponente principal de estos sistemas lo constituye el denominado sistema LTE (*Long Term Evolution*). Debido a la popularidad de esta tecnología en el mundo de la telefonía móvil y a la intención del 3GPP (se trata del organismo a nivel mundial responsable de la estandarización de LTE) de incluir casos y funcionalidades de uso en el ámbito ferroviario, se incluye un apartado específico para acometer un estudio detallado de esta.

4.1.1 3GPP LTE

La acreditación de cumplimiento del IMT-A por parte de LTE, no se produce hasta el lanzamiento de la *release 10*, en lo que ha pasado a denominarse LTE-A (*LTE - Advanced*).

LTE es una tecnología que permite a los usuarios alcanzar *throughputs* máximos y velocidades de pico más elevados que los que proporcionan las redes 3G, además de un rendimiento espectral mayor. LTE se sustenta en un nuevo esquema de acceso múltiple en la interfaz radio basado en OFDMA en el enlace de *downlink* (dando la posibilidad de que las portadoras se asignen a diferentes usuarios) y en SC-FDMA en el enlace de *uplink*, e incorpora un esquema MIMO, dando soporte a la modulación y a la codificación adaptativa.

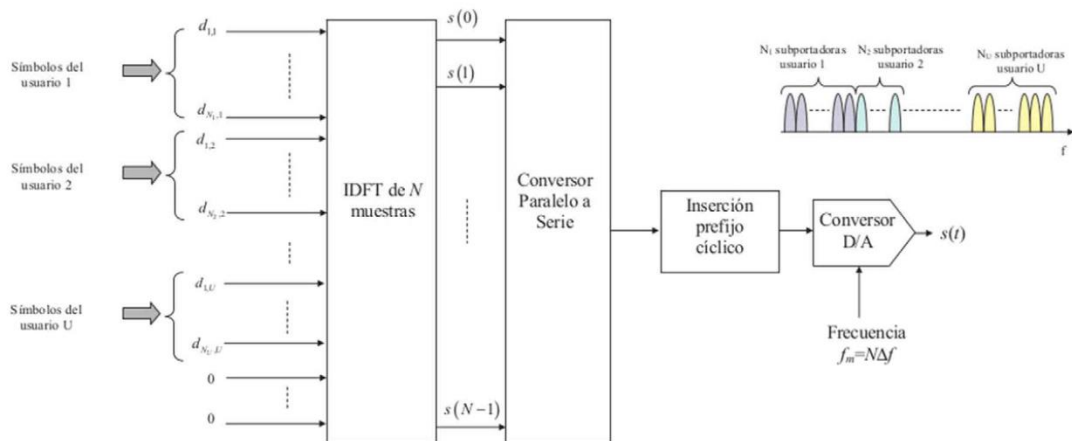


Figura 18. Multiplexación de usuarios en OFDMA [26]

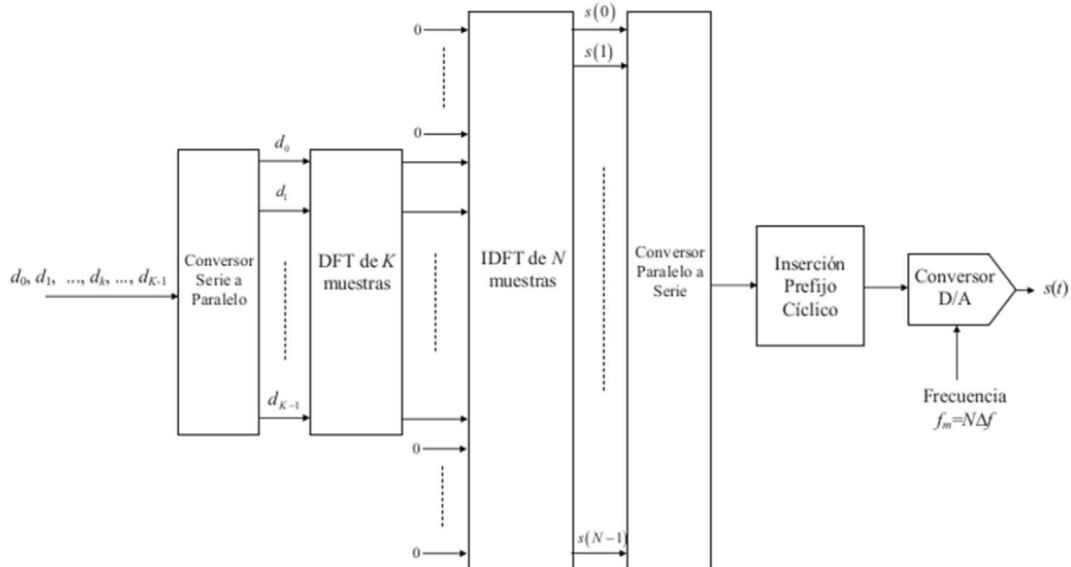


Figura 19. Esquema SC-FDMA para el enlace ascendente [26]

La arquitectura del sistema LTE se basa en un conjunto de nodos e interfaces que posibilitan la comunicación entre una estación base y un terminal móvil. Una de sus principales innovaciones es que se trata de una arquitectura muy plana y simple: diversas funcionalidades como las controladoras y las estaciones base se integran

ahora en un mismo equipamiento. De esta forma se consigue, por una parte, ahorrar costes y por otro, suprimir retardos de extremo a extremo.

En la arquitectura de LTE se aprecian dos niveles fundamentales: la red de acceso y el core de red. El acceso (E-UTRAN) comprende a los terminales móviles, las estaciones base y a las interfaces entre ellos. El núcleo (EPC) lo constituye el equipamiento fijo, que incluye la interfaz con el resto de redes.

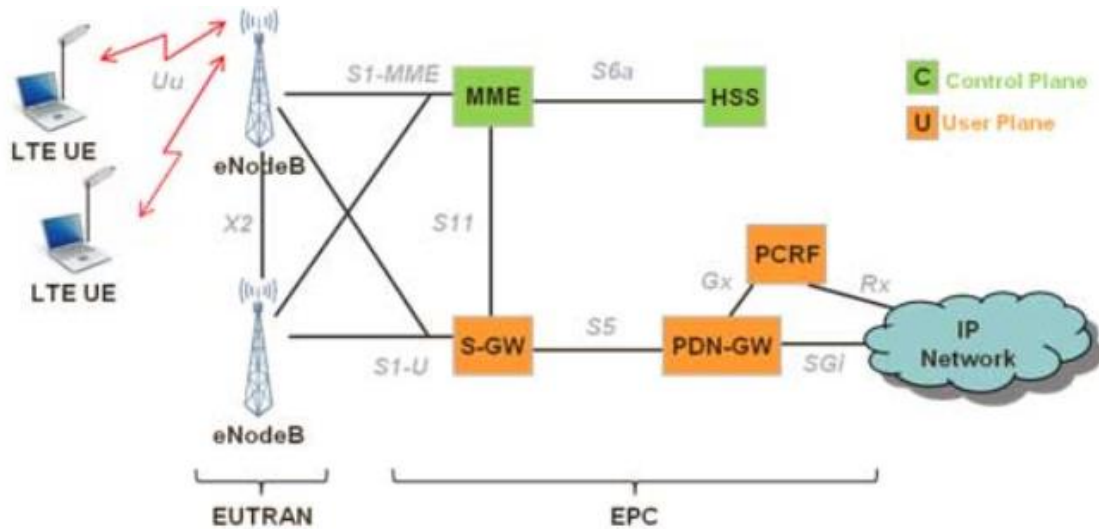


Figura 20. Arquitectura de la red LTE [27]

En la red de acceso se encuentran los eNodeB. Los nodos B están conectados entre sí a través de la interfaz X2 y con el núcleo a través de la interfaz S1-MME, para el plano de control; y de la interfaz S1-U, para el plano de usuario. La interfaz aire a través de la que se conectan los usuarios, es la U_u. En los eNodeB se realizan tareas de gestión de recursos radio como el control de admisión, control de la movilidad, planificación, control de interferencias y control del estado del canal. En los eNodeB finalizan todos los protocolos de la capa radio.

Una característica intrínseca a LTE es su grado de flexibilidad y se manifiesta en la capacidad de los terminales LTE para registrarse en la red y que un eNodeB pueda seleccionar de manera dinámica al MME.

En lo concerniente al core de la red, destacar que su objetivo principal se focaliza en proporcionar conectividad IP e interconectar a la red LTE con otras redes. La red troncal la constituyen tres entidades fundamentalmente:

- MME: encargado de las funciones del plano de control.
- P-GW: es la pasarela de interconexión hacia las redes de paquetes externas. Asigna las direcciones IP y mide la calidad del servicio.
- S-GW: es la pasarela del plano de usuario entre la red de acceso y la red troncal.

Las tres maneras por las que LTE-A incrementa en eficiencia y tasa de bit son MIMO, la agregación de portadoras y las redes heterogéneas. El objetivo de una red heterogénea reside en el incremento de la eficiencia espectral por unidad de área una vez que la eficiencia espectral por enlace se acerca a su límite físico. Las redes heterogéneas rompen con el enfoque clásico basado en comunicaciones móviles a

través de macro-celdas y pretenden acabar con los huecos de cobertura de las macro-celdas o mejorar la capacidad en algunos puntos de gran demanda. En las redes heterogéneas conviven distintos tipos de celdas:

- Macro-celdas: estaciones base que transmiten con una potencia elevada.
- Micro, pico y femto-celdas, cuya cobertura se superpone a la macro, pero con una potencia transmitida mucho mejor.
- Repetidores de señal.

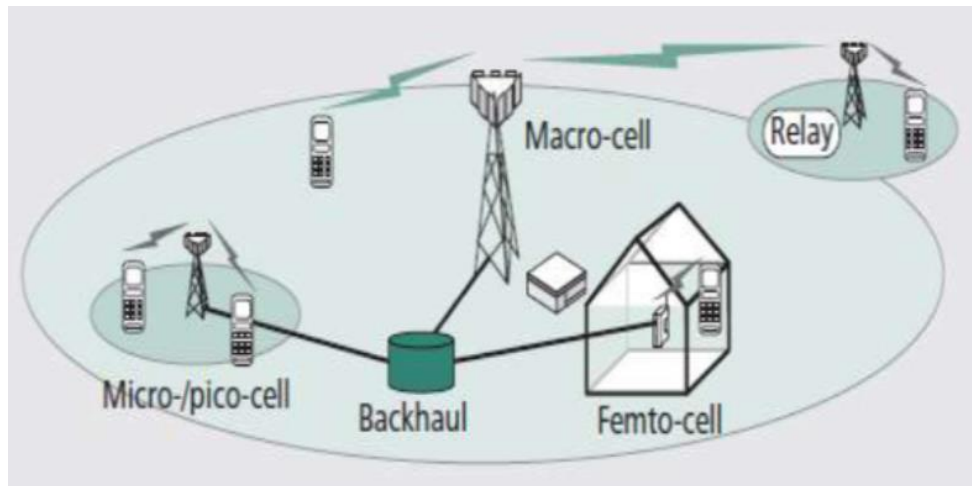


Figura 21. Ejemplo de red heterogénea con diversos tipos de celda [28]

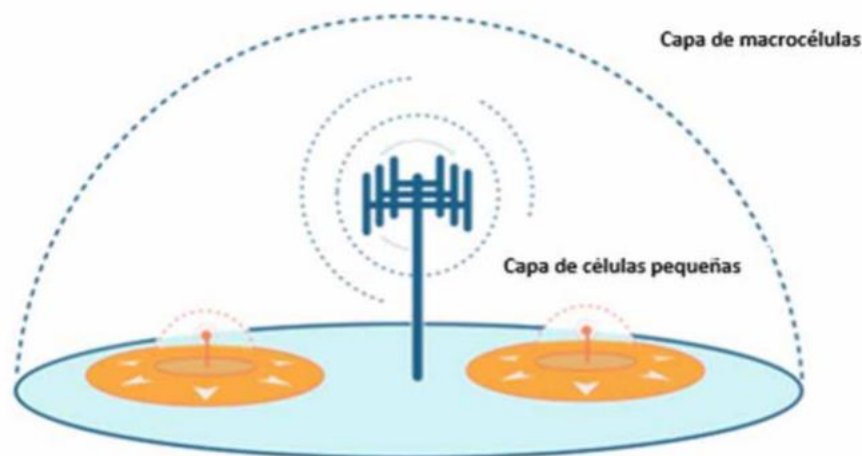


Figura 22. Redes de macro-celdas frente a redes de celdas pequeñas [29]

En un despliegue de estas características, se solapan coberturas y se busca por lo tanto un alto grado de eficiencia. Por lo tanto, el empleo de técnicas avanzadas en aspectos relacionados con la coordinación en la asignación de recursos entre estaciones base y el control de interferencias, resulta imprescindible.

El primer problema que aparece a la hora de considerar LTE como una tecnología candidata a prestar los servicios inalámbricos en el entorno ferroviario suburbano, es el espectro. En primer lugar, se requiere conocer en qué banda va a funcionar el sistema. En LTE existen dos posibilidades:

- Bandas públicas: se trata generalmente de un servicio prestado por los operadores móviles. En este caso, los operadores ferroviarios tendrían que depender de los

operadores móviles y de sus infraestructuras. Esta dependencia podría llegar a implicar grandes inversiones de capital, lo que aumentaría los costes de forma notable. Además, ante una incidencia grave, los servicios ferroviarios podrían verse perjudicados seriamente si el operador no tuviera una capacidad de respuesta rápida.

- Bandas privadas: los servicios ferroviarios serían los usuarios únicos de la red.

El espectro de LTE requiere normalmente de una licencia para poder emitir en él, aunque existe un caso de emisión en banda libre que se denomina *LTE-Unlicensed Multefire*, que emite en el rango de frecuencias libres de 5 GHz, pero tiene que compartir espectro con todas las tecnologías que emitan en el mismo espectro. Si se requiere un espacio radioeléctrico sin interferencias, habría que pagar una licencia de emisión o bien, llegar a un acuerdo con algún operador de telefonía como ya se ha indicado.

4.1.2 La nueva radio 5G

En los últimos cuatro años, han ido apareciendo nuevas iniciativas y servicios que no pueden cubrirse con 4G como, por ejemplo, la realidad virtual, el “Internet de las Cosas” (*IoT*) y las comunicaciones vehiculares donde la ultra baja latencia es fundamental.

Las primeras especificaciones sobre la nueva radio 5G comenzaron con la *release* 14 de LTA-A Pro del año 2016. Uno de los requisitos fundamentales de 5G es la posibilidad de soportar un gran rango de frecuencias, particularmente de bandas milimétricas. 5G no es una tecnología LTE mejorada, sino que se trata de una propuesta de red versátil que soportará una gran variedad de servicios y a un gran número de usuarios. No se trata de una tecnología madura y se prevé que para este año 2020, se termine de definir por completo.

Las elevadas velocidades y la baja latencia que promete la 5G impulsarán a las sociedades hacia una era de *smartcities* e *IoT*. La ITU-R y las partes interesadas del sector industrial han definido tres posibles casos de uso:

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB).
- Comunicaciones masivas entre máquinas (mMTC).
- Comunicaciones ultrafiabiles y de baja latencia (URLLC).

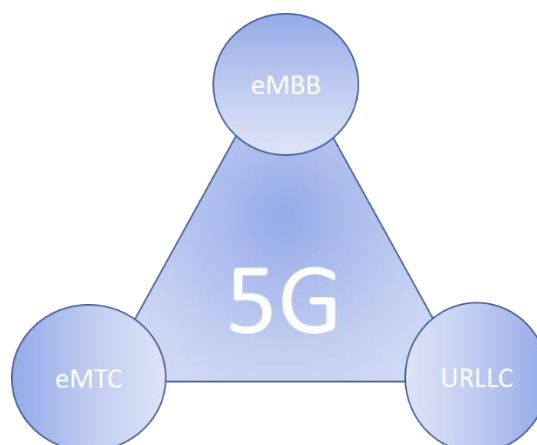


Figura 23. Casos de uso 5G

Pese a ser una tecnología inmadura y difícilmente abordable en la actualidad para el ámbito ferroviario (históricamente la industria ferroviaria se ha mostrado renuente a abrazar nuevas tecnologías), se procede a detallar de forma muy esquemática la filosofía sobre la que residen sus bases.

El espectro radioeléctrico, los enlaces de conexión al *core* de la red, la informatización de las redes básicas y las redes de acceso radioeléctrico, desempeñarán un papel fundamental en la instalación de las primeras redes 5G, especialmente en lo que a eMBB concierne.

La flexibilidad de extremo a extremo figurará entre las propiedades intrínsecas de las redes 5G y resultarán en gran medida de la introducción del proceso de informatización de la red, en cuyo contexto, las funciones de los soportes físico y lógico de la red básica estarán separadas. La informatización de la red -a través de la virtualización de las funciones de red (NFV), las redes definidas por SW (SDN), la segmentación de las redes (*Network Slicing*) y las RAN en la nube (C-RAN)- tiene como misión aumentar tanto el ritmo de la innovación, como la velocidad de transformación de las redes móviles:

- NFV: Se reemplazan las funciones de red de dispositivos específicos, a instancias virtualizadas que se podrán ejecutar en soportes físicos disponibles en el mercado.
- SDN: control de las redes 5G a través de un soporte lógico, que mejorará la resiliencia, la calidad de funcionamiento y la calidad de servicio de la red.
- *Network Slicing*: Se consigue dividir una red física en múltiples redes virtuales capaces de soportar diferentes RAN o tipos de servicios por segmentos de usuarios.
- C-RAN: arquitectura de red radioeléctrica basada en la nube, que emplea técnicas de virtualización en combinación con unidades de procesamiento centralizadas, que vienen a sustituir a las unidades de procesamiento de señales distribuidas en estaciones base móviles y serán capaces de reducir los costes de instalación de las redes móviles densas basadas en celdas pequeñas (micro, pico y femto).

Para poder soportar las diferentes aplicaciones usando la misma tecnología 5G, se ha tenido que evolucionar la capa física hacia un modelo más flexible y escalable: se ha modificado el tamaño de las subportadoras, el prefijo cíclico y el intervalo de tiempo de transmisión.

En cuanto al ancho de banda, se espera que en bandas por debajo de los 6 GHz sea de 100 MHz y de 400 MHz en bandas milimétricas.

Para asegurar la coexistencia con LTE, el despliegue 5G, requiere incorporar unos nodos de tipo gNB que se interconectarán entre ellos y con los actuales nodos LTE (eNB) a través de la interfaz X_n . La nueva red radio de acceso, contendrá nodos gNBs y eNBs, que proporcionarán las terminaciones de los protocolos NR y E-UTRAN, a los planos de control y de usuario hacia el UE (*user equipment*):

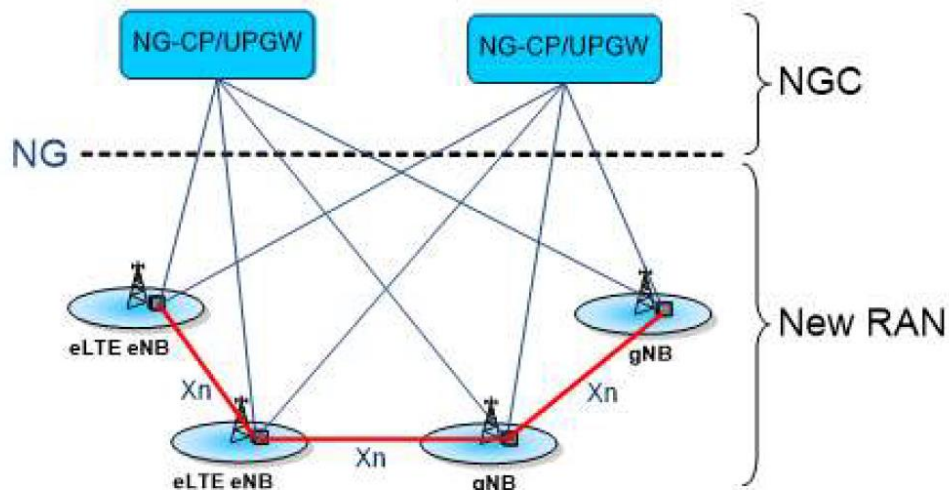


Figura 24. Coexistencia redes LTE-5G NR [30]

4.2 Estándar 802.11

La familia de estándares 802.11 consiste en una agrupación de requerimientos que solo afecta a las capas físicas y MAC. La capa MAC determina las reglas de acceso al medio y el envío de datos mientras que los detalles de la transmisión y la recepción se dejan a la capa física.

IEEE 802.11 es un mecanismo de conexión de dispositivos electrónicos de forma inalámbrica. La norma fue diseñada para sustituir el equivalente a las capas físicas y MAC de la norma 802.3 (Ethernet), lo que quiere decir, que en lo único en que se diferencia una red WiFi de una red Ethernet, es en cómo se transmiten las tramas o paquetes de datos; el resto es idéntico. Por tanto, una red local inalámbrica 802.11 es completamente compatible con todos los servicios de las redes locales Ethernet de cable (LAN).

La familia 802.11 está compuesta por diversas enmiendas que se han ido sucediendo en el tiempo (mejorando las prestaciones como el ancho de banda o la tasa de datos) y su reconocimiento ha venido de la mano de la consolidación tecnológica de WiFi (*Wireless Fidelity*), que es la marca de la organización Alianza Wi-Fi. Se trata de una tecnología semi-dúplex, lo que implica que ambos extremos del canal pueden transmitir, aunque no a la vez, y se garantiza la compatibilidad de todos los dispositivos que cumplen con las especificaciones del estándar [31].

Para el caso de los ferrocarriles suburbanos, esta tecnología se manifiesta a través de dos formas distintas: mediante el despliegue de redes privadas para proporcionar el servicio de misión crítica de señalización (CBTC) y los distintos servicios relacionados con la operativa y el mantenimiento del tren (telemetría) o también y a elección de cada infraestructura, para proporcionar acceso a Internet a los viajeros bien solo en el recinto de la estación, o bien tanto en estaciones como dentro de los trenes. En determinadas infraestructuras este servicio solo se ofrece al personal interno de estaciones y mantenimiento para que, a través de sus terminales inalámbricos, puedan desempeñar

sus funciones y actividades diarias. Las enmiendas más utilizadas y también las más comunes en la industria del ferrocarril, son las 802.11a/b/g/n/ac.



Figura 25. Solución del fabricante ACKSYS de comunicación WiFi [32]

Estas redes se despliegan en bandas sin licencia y de acceso libre, bien en la banda de 2.4 GHz o en la de 5 GHz (o en ambas), dependiendo de la enmienda del estándar.

La banda de 2.4 GHz, se encuentra especialmente saturada y también comienza a sufrir el mismo inconveniente la banda de 5 GHz, aunque en menor medida. Se trata por tanto de bandas que se encuentran saturadas, donde la interferencia entre puntos de acceso (AP) es considerable y a la que hay añadir las interferencias que provocan las líneas de alimentación.

Una ventaja que presentan las tecnologías 802.11, es que son tremendamente resistentes y son capaces de operar en entornos ruidosos, valiéndose del protocolo CSMA/CA [33]. Este protocolo resulta ideal para evitar colisiones cuando varias estaciones emiten en el mismo ancho de banda, gracias a que cada equipo está permanentemente escuchando y analizando el medio. Además, antes de emitir, el equipo anuncia el canal en el que lo hará y como todos los equipos se encuentran escuchando, se logran evitar las colisiones.

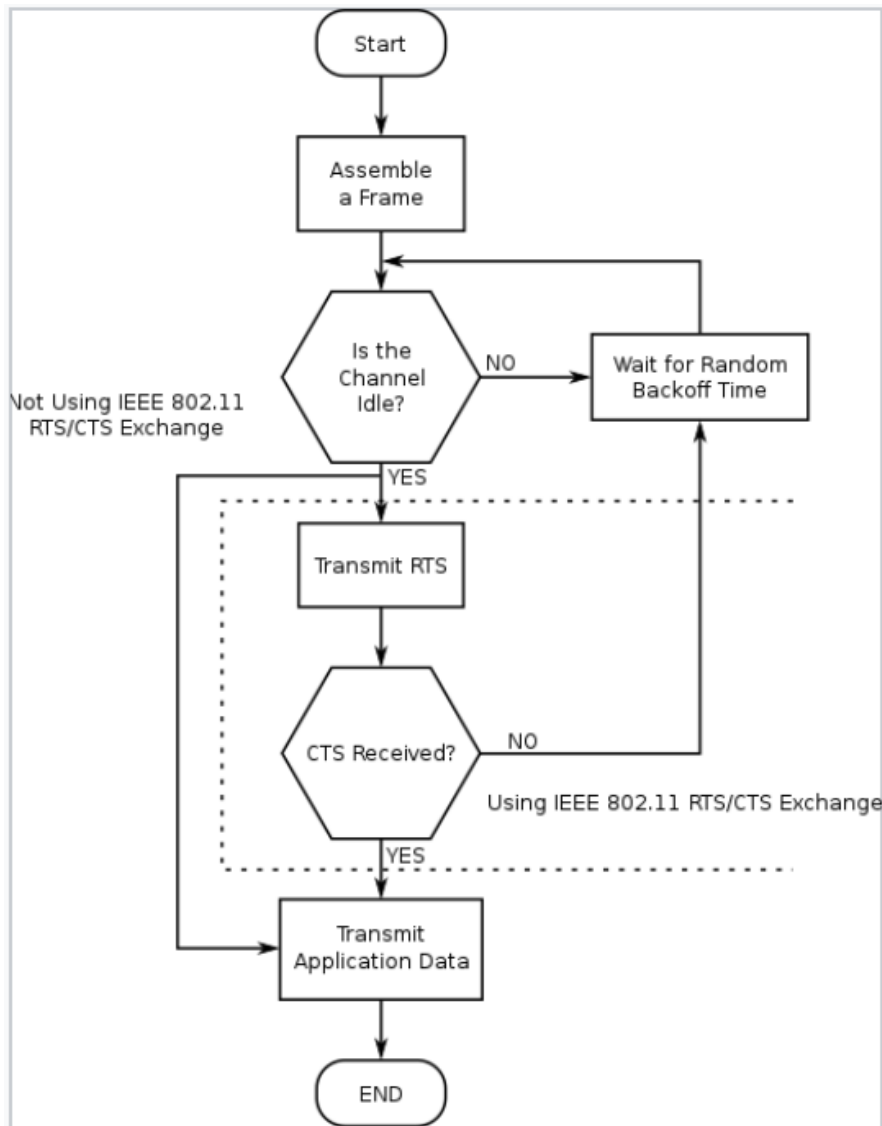


Figura 26. Algoritmo simplificado CSMA/CA [34]

En la banda de 2.4 GHz, solo existen tres canales de un total de 13, que no se solapan. En la banda de 5 GHz, existen veintitrés canales que no se solapan, con 20 MHz de ancho de banda por canal y, además, realizando agrupación de bandas, se pueden formar canales de hasta 40, 80 e incluso 160 MHz (en este caso solo habría dos canales).

La arquitectura de la tecnología 802.11 es análoga a la de LTE en muchos aspectos. Por una parte, existen los UE (denominados usuarios o clientes), las EB (estaciones base) o puntos de acceso (AP) y las WLC (controladoras de las estaciones base). En la tecnología 802.11, el protocolo de comunicación entre un UE y la EB, es estándar, no así el protocolo entre los AP y las WLC, ni tampoco la comunicación entre distintos WLC. Así, existen diversos fabricantes que han desarrollado soluciones propietarias y que, por tanto, no son interoperables.

Al estándar 802.11 creado en 1997 y que especifica dos velocidades de transmisión teóricas de 1 y 2 Mbps que se transmiten por señales IR (infrarrojas), le siguió el 802.11b, que fue el primero de la familia aceptado ampliamente por los consumidores. Esta versión se implementó en algunos sistemas CBTC y en sistemas tren-tierra de

propósito general y funciona en la banda de 2.4 GHz. Posteriormente surgirían versiones mejoradas: 802.11a, 802.11g, 802.11n y 802.11ac [31].

La versión 802.11a, que era la primera en introducir la técnica OFDMA, opera en la banda de 5 GHz y está compuesta por 56 subportadoras (de las que 52 son utilizables) y 12 canales sin solapamiento (8 para la red inalámbrica y 4 para las conexiones punto a punto). Tiene una velocidad de datos nominal de 54 Mbps, lo que convierte a esta enmienda en un estándar práctico para redes inalámbricas reales de aproximadamente 20 Mbps [35].

La enmienda g es similar a la a: alcanza velocidades de datos más altas, utilizando canales más anchos (de 20 y de 40 MHz) y utiliza técnicas MIMO.

Tras el desarrollo e implementación del estándar 802.11n, surge la necesidad de conseguir redes más rápidas. Es por esta razón por la que se crea el grupo de trabajo denominado VHT (*Very High Throughput*) que se divide a su vez, en dos subgrupos: el grupo de trabajo ac, que se encargaría de la banda existente por debajo de los 6 GHz y compatible con todos los estándares anteriores; y el grupo de trabajo ad, que se encargaría de la banda existente en 60 GHz. Este segundo grupo se encuentra con la desventaja de que hay que cambiar por completo el concepto de las redes inalámbricas que se tenía hasta ese momento y, adicionalmente, el alcance se ve drásticamente reducido debido a las altas frecuencias utilizadas.

Las primeras pruebas realizadas para sistemas tren-tierra basadas en las enmiendas n y ac, demostraron velocidades de datos de 50 Mbps y 300 Mbps respectivamente. La enmienda ac (conocida también como WiFi 5), es una mejora de la n y funciona en la banda de 5 GHz: permite hasta 8 flujos MIMO, canales de 20, 40, 80 y 160 MHz de ancho de banda e incluye modulación de alta densidad (256 QAM).

En los siguientes puntos se enumeran las principales diferencias entre las enmiendas n y ac:

- IEEE 802.11ac presenta canales más anchos: con el estándar ac surgen nuevos tipos de canales: los de 80 y 160 MHz.
- Modulación 256-QAM. Tal y como ocurre con el resto de las enmiendas, las transmisiones se constituyen por una serie de símbolos formados por un conjunto de bits. Con las enmiendas anteriores a ac, se podían enviar hasta 6 bits en un periodo de símbolo. La enmienda ac permite transmitir hasta 8 bits por periodo de símbolo.
- Con el estándar ac se simplifican todas las técnicas de *beamforming* (*) existentes con anterioridad y se elige un único método para que todos los dispositivos sean compatibles entre sí.
- La enmienda ac permite más flujos espaciales (hasta 8) y MU-MIMO (*Multiuser MIMO*).
- La enmienda ac trabaja en la banda de 5 GHz solamente, la n trabaja tanto en 2.4 como en 5 GHz.

Por último, la enmienda 802.11ax (conocida también como WiFi 6) se ha diseñado para operar en los espectros ya existentes de 2.4 y 5 GHz y se espera que comience a consolidarse este año.

En la siguiente tabla, se resumen las principales características de algunos de los distintos estándares WiFi:

Parámetro	802.11	802.11a	802.11b	802.11n	802.11ac
Velocidad teórica (Mbps)	2	54	11	600	6.93 GHz
Velocidad práctica (Mbps)	1	22	6	100	100
Frecuencia (GHz)	2.4	5	2.4	2.4 y 5	5
Ancho de banda (MHz)	22	20	22	20/40	20, 40, 80 y 160
Alcance (m)	330	390	460	820	Alcance menor, mejorable con la técnica <i>beamforming</i> (*)

Tabla 9. Especificaciones enmiendas WiFi según [36]

(*) El uso de *beamforming* en la comunicación del AP hasta el cliente es una de las áreas de mayor interés de la enmienda 802.11ac. El *beamforming* consiste en un procedimiento a partir del cual el transmisor puede dirigir su energía en una dirección en particular para aumentar la SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) y ganar así en velocidad de transmisión [37]. Para conseguirlo, se recurre a la utilización de un array de elementos colocados a una distancia en particular. Las señales que estén separadas por un ángulo determinado sufrirán interferencia constructiva, y el resto, interferencia destructiva. Es una técnica que se puede utilizar tanto en el lado del transmisor como en el del receptor, de forma que se puede llegar a obtener diversidad espacial. El empleo de *beamforming* aumenta el rendimiento de las redes inalámbricas en distancias medianas.

El *beamforming* se utiliza en MU-MIMO para enviar tramas a diferentes localizaciones en el mismo instante de tiempo, permitiendo reducir el tiempo de espera de los distintos dispositivos conectados para recibir la señal inalámbrica e incrementando significativamente la velocidad de la red [38].

4.3 Selección de la tecnología

En este apartado se va a proceder a analizar distintos puntos de vista de las tecnologías expuestas para tomar una decisión respecto a la tecnología a seleccionar.

El primer análisis consiste en plantear las distintas posibilidades que ofrece cada tecnología en cuanto a espectro se refiere.

- Con 3GPP LTE, tal y como ya se ha expuesto, se podría:

- Utilizar bandas de frecuencia con licencia asignadas generalmente a operadoras que las han adquirido. El ancho de banda podría llegar hasta los 100 MHz con agregación de bandas, aunque lo normal es adquirir parte del espectro a una operadora. Por ejemplo, la operadora podría ceder 10 MHz para obtener una red LTE privada por parte de la infraestructura ferroviaria suburbana. Otra opción, sería pasar a ser otro cliente más de la operadora, compitiendo con el resto de los clientes por los recursos. Las operadoras suelen disponer de 20 MHz. En cualquiera de los casos, el ancho de banda se debería dividir en los canales suficientes para dotar a la vía de cobertura y para evitar también interferencias.
- Emplear bandas de frecuencia libres LTE-U *Multefire*. En este caso, se recurriría a la banda de 5 GHz con 500 MHz disponibles, pudiendo usar canales de hasta 100 MHz. El principal problema de LTE-U *Multefire* es que está muy limitado en potencia, lo que supondría un aumento considerable en el número de estaciones base a instalar (eNB) y por este motivo, se va a descartar esta opción.
- Con IEEE 802.11, las bandas de frecuencias de operación son libres (tanto la de 2.4 como la de 5 GHz).

Después de tener claro cuál es el espectro disponible para el despliegue, se debe tomar una decisión con respecto a la utilización de este: se va a proceder a su división en celdas. Para evitar la interferencia entre celdas adyacentes, cada una de estas celdas debe operar en una frecuencia diferente y, por consiguiente, se realiza una división del espectro como ya se ha anticipado.

- Con LTE 3GPP:
 - Si se dispone de la red privada con 10 MHz disponibles, se podría hacer una división de dos rangos de 5 MHz cada uno, usando bandas en modo no pareado TDD.
 - Para el modo pareado FDD, van a ser necesarios cuatro rangos de frecuencia, permitiendo la emisión simultánea tanto de forma ascendente como descendente. Con LTE tendríamos que hacer una división de canales de 1.4 MHz (se gana en canales, aunque se pierde en ancho de banda por cada canal).
 - Compartiendo los recursos de una operadora concreta, dispondríamos de los 20 MHz como un cliente más: 10 MHz de ancho de banda por celda en TDD y 5 MHz en FDD.
- Con IEEE 802.11:
 - En 2.4 GHz: tres canales que no se solapan entre sí. Cada uno de estos canales dispone de 20 MHz.
 - En 5 GHz: canales de hasta 160 MHz sin que exista solapamiento.

A continuación, se plasma en una tabla la comparativa para cada tecnología, del ancho de banda disponible, del ancho de banda disponible por celda y de la tasa de velocidad nominal por celda:

	LTE privada en modo TDD	LTE privada en modo FDD	LTE compartida en modo TDD	LTE compartida en modo FDD	802.11 en banda de 2.4 GHz	802.11 en banda de 5 GHz
BW total disponible (MHz)	10	10	20	20	100	555
BW por celda (MHz)	5	1.4	10	5	20	160
Tasa de velocidad nominal por celda (Mbps)	25	6	50	25	72	867

Tabla 10. Tabla comparativa con datos de distintas tecnologías

Los datos expuestos se corresponderían con una dotación de cobertura de vía sin contemplar ningún tipo de redundancia. Como la tecnología que se va a seleccionar se convertirá en la responsable de dar cabida a la prestación de distintos servicios entre los que se encuentran algunos críticos, se debe incluir redundancia de cobertura para que, si alguna estación base deja de funcionar, la cobertura persista y no desaparezca en ningún punto de la vía. Como consecuencia de incluir redundancia se van a acercar las estaciones base y van a ser necesarios más de dos canales para lograr evitar las interferencias entre las celdas adyacentes.

- En el caso de una LTE compartida en modo TDD, existirán cuatro rangos de frecuencias de 5 MHz cada uno.
- En IEEE 802.11 en la banda de 5 GHz, se pueden obtener 5 canales sin solapamiento de 80 MHz.

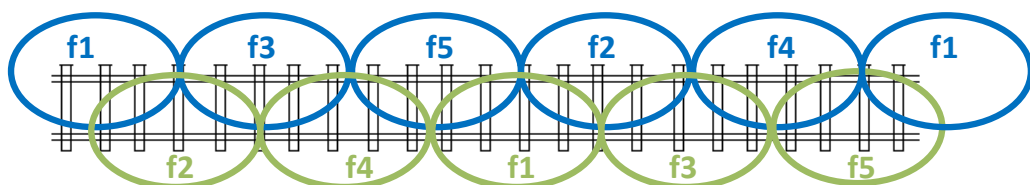


Figura 27. Redundancia en vía con IEEE 802.11 ac

Al haber dividido el espectro en más celdas, inevitablemente, las prestaciones empeorarán.

De cara a elegir alguna de las tecnologías propuestas y sin perder de vista que el objetivo reside en dotar de cobertura a una línea de metro que va a ser completamente subterránea se deben considerar los siguientes aspectos:

- A mayor frecuencia y en condiciones de LOS (túneles rectos), mejor propagación de la señal radio se obtiene debida al efecto guía onda. En este sentido, se impone bien la tecnología IEEE 802.11 en la banda de 5 GHz, bien LTE-U, que también opera en esa misma banda (con la limitación de potencia antes indicada).

- Las celdas que usen el mismo rango de frecuencias se deberán disponer lo más alejadas posible para evitar la interferencia cocanal. Con respecto a esta disposición, también IEEE 802.11 como LTE-U en la banda de 5 GHz presentan ventajas sobre LTE. En concreto, la enmienda 802.11 ac, dispone de más canales.
- Una de las contraprestaciones a considerar tanto en IEEE 802.11 como en LTE-U, es el nivel de las interferencias que sufren, motivado por el uso de dispositivos tanto de la red como ajenos a ella. Sin embargo, al tratarse de una línea de metro, no se tendrá que competir por los recursos con otros clientes ajenos a los servicios contemplados en este trabajo (todos los recursos serán exclusivos de la infraestructura ferroviaria suburbana).
- Una ventaja indiscutible tanto de IEEE 802.11 como de LTE-U es que no hay que pagar ninguna licencia por el uso de la banda.
- En términos de escalabilidad, con IEEE 802.11, tan solo sería necesario conectar más AP a los puertos libres de los *switches* y de forma totalmente automática, los nuevos AP quedará conectados al *cluster*. Con la tecnología LTE, sería necesario emplazar nuevos eNB, que resultan más costosos.

Analizando las alternativas se opta por realizar el diseño del sistema TTBA con tecnología WiFi. En concreto, el diseño se pretende llevar a cabo haciendo uso de la enmienda ac, ya que la ax todavía no se ha popularizado ni extendido lo suficiente. El motivo de la elección se fundamenta en los pilares siguientes: regulación del espacio radioeléctrico y necesidades de los distintos servicios ferroviarios en términos de capacidad.

El hecho de que la tecnología WiFi opere en bandas sin licencia la habilita como tecnología aventajada con respecto a LTE: se logra evitar la dependencia con un operador móvil que sí disponga de banda licenciada y, por tanto, se esquivo una elevada inversión de capital que debería realizarse para la contratación de un servicio de banda ancha.

Con respecto a la prestación de servicios ferroviarios, la enmienda ac ofrece canales de 80 y hasta 160 MHz. En la siguiente figura se aprecia la distribución de dichos canales:

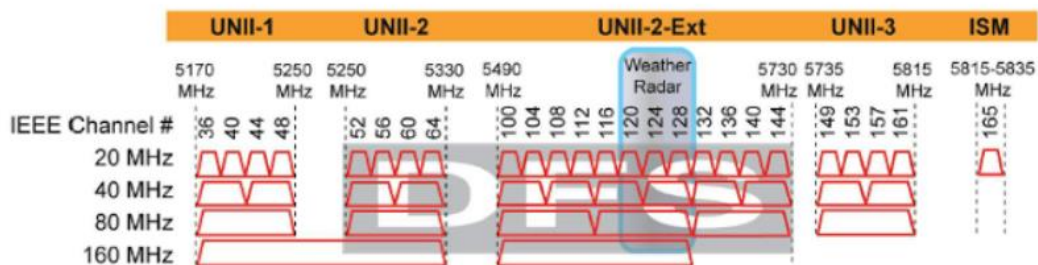


Figura 28. Canales y bandas de frecuencia estándar 802.11ac [39]

De las bandas disponibles, las denominadas UNII-2 y UNII-2-Extendido, cuentan con restricciones regulatorias por parte de CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias). Se trata de bandas reservadas prioritariamente para el Estado para servicios de radiolocalización y radares meteorológicos del Ministerio de Defensa y podrían llegar a suponer interrupciones en el servicio de la red TTBA, pues la regulación

exige la liberación inmediata del medio en el momento en el que se detecta un radar. No obstante, al tratarse de túneles subterráneos, los radares no van a tener ningún tipo de influencia y no provocarán afecciones sobre el servicio.

Por lo tanto, el criterio de diseño para el sistema de comunicaciones TTBA de aquí en adelante será emplear el estándar IEEE 802.11ac.

CAPÍTULO 5

DISEÑO DE LA RED TTBA PARA LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA



5. Diseño de la red TTBA para la tecnología seleccionada

5.1 Datos de partida del escenario

Como se ha anticipado en la introducción del trabajo, el escenario que se va a escoger para llevar a cabo la propuesta de diseño es una de las líneas pertenecientes a Metro de Madrid.

Hasta 1919, Madrid no tuvo metro. Desde la última década del siglo anterior, la posibilidad de que existiera un transporte que recorriera el subsuelo de la ciudad fue un proyecto acariciado por algunos precursores que no tuvieron la suficiente suerte o no contaron con el apoyo requerido; a partir del nuevo siglo, un negocio potencial para los artífices del desarrollo urbanístico de la capital y, para el ciudadano general, un sueño utópico de ciencia ficción, que atemorizaba un poco. Para Madrid, resultó vital [40].



Ilustración 3. Talleres de Carde y Escoriaza (Zaragoza), 1919 con los coches del Metropolitano de Madrid [41]

Cien años más tarde, Metro de Madrid es una red de ferrocarril metropolitano que da servicio a la ciudad de Madrid y a su área metropolitana. Con un total de 302 estaciones, es la tercera red de Europa por kilómetros, después de las de Londres y Moscú, la novena del mundo [42] y la quinta red del mundo en número de estaciones. La misión de Metro de Madrid enfatiza la vocación de prestar un servicio público de calidad, eficiente y comprometido con el cliente, al tiempo que lo hace potenciando la seguridad, la sostenibilidad y la innovación tecnológica [43].

Los datos más relevantes como infraestructura ferroviaria metropolitana los podemos observar en la siguiente tabla, compuesta de imágenes extraídas de la página oficial de

Metro de Madrid [43]. Los datos hacen referencia a la situación de Metro a cierre del año 2018:

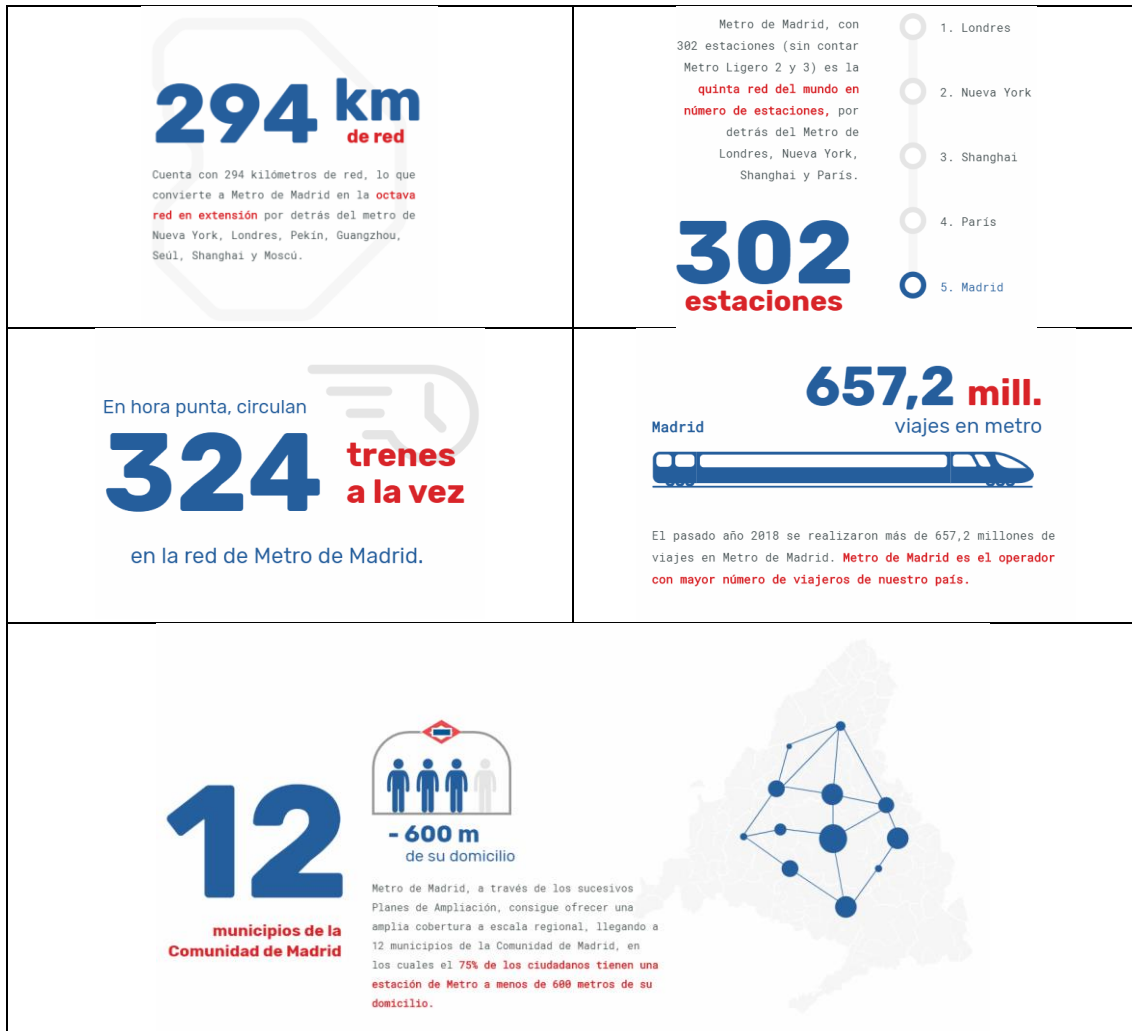


Tabla 11. Datos macro de Metro de Madrid a cierre del año 2018 [43]

5.1.1 Datos de la Línea 8

El escenario en el que se va a realizar el estudio se corresponde con la Línea 8 de Metro de Madrid.

La línea 8 de Metro de Madrid es una de las radiales externas de la red que recorre el centro y nordeste de la ciudad y su importancia radica en que conecta la estación de Nuevos Ministerios con las cuatro terminales del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas [44].



Figura 29. Trazado de la Línea 8 (color rosa) [45]

La línea comprende 16.467 km de doble vía en un recorrido de 20 minutos aproximadamente y cuenta con un total de 8 estaciones cuyos andenes tienen 115 m de longitud y están diseñados para la circulación de trenes de gálibo ancho (albergan mayor capacidad de clientes) [44].



Tabla 12. Conjunto de imágenes representativas de estaciones de Línea 8

Se trata de la primera línea electrificada a una tensión de 1500V y permite la circulación del material de la serie 8000 1ª (fabricado por ALSTOM / CAF) que alcanza una velocidad máxima de 150 km/h (no comercial) y que la convierte en la línea más rápida. En concreto, la subserie que circula por esta línea es la 8000 monotensión del tipo “MSRM”. La letra M corresponde a los coches motores extremos con cabina, la letra R

a los coches remolques intermedios y la letra S a los coches motores intermedios sin cabina [47].

Las unidades 8000 1ª serie comenzaron a circular en servicio comercial el día 14/01/2002 al ponerse en servicio el tramo Mar de Cristal-Nuevos Ministerios de Línea 8, coincidiendo con la reapertura en gálibo ancho y tensión de 1500V del tramo Mar de Cristal-Barajas de la misma línea. Se trataba de las 10 primeras unidades de la serie (originalmente en composición MRM) dotadas de furgón y maleteros que se han utilizado desde entonces casi exclusivamente en la Línea 8 [47].

La caja de los coches 8000 está construida en aluminio con 4 puertas por costado para acceso de viajeros. El accionamiento de las puertas es mediante motores eléctricos. Los coches poseen pasillo de intercurrencia entre todos ellos, formando así composiciones de coches interiormente continuas. El equipo de tracción es trifásico con onduladores directos de red y componentes de potencia IGBT. El frenado de servicio es eléctrico mixto reostático y regenerativo y el freno neumático (que es también el freno de servicio en los remolques).



Ilustración 4. Unidad 8000 de las destinadas a la Línea 8, durante las pruebas de puesta a punto en el Depósito de Canillejas [46]

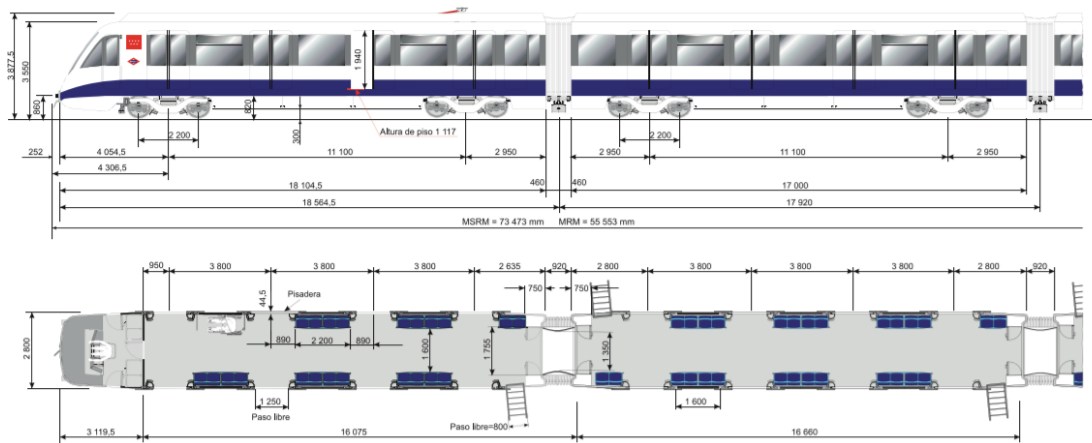


Figura 30. Plano con cotas de la serie 8000 MSRM que circula por la Línea 8 [47]



Ilustración 5. Vista exterior de la serie 8000 MSRM [47]

Las particularidades más destacables de esta línea son las siguientes [44]:

- Históricamente se ha convertido en la primera línea dotada en su totalidad de cobertura para telefonía móvil.
- Tiene la velocidad media registrada más elevada de toda la red: 60 km/h.
- La distancia media entre estaciones es algo mayor que en el resto de las líneas.
- En hora punta circulan 12 unidades MRSM, aunque existen un total de 14 unidades disponibles de cuatro coches para dar servicio a la línea.

- Su construcción fue financiada parcialmente con fondos de cohesión de la Unión Europea.

De ahora en adelante se va a realizar la suposición de que el material rodante de la Línea 8 está equipado con una consola que posibilita:

- Las comunicaciones tren-tierra con la calidad establecida.
- La creación de una nueva red de área local embarcada instalada a lo largo del tren que admite la interconexión vía Ethernet de cualquier elemento embarcado con cualquier otro elemento existente dentro del mismo tren (vía la red de área local) o externo (vía la red de comunicaciones TTBA).
- La instalación de los elementos necesarios que facilitan la gestión y el control tanto local como remoto de los elementos instalados.

Adicionalmente, el escenario propuesto cuenta con que el sistema de señalización de los trenes de Línea 8 se basa en la tecnología CBTC.

5.2 Requisitos funcionales

A continuación, se resumen los requisitos funcionales para los diferentes servicios explicados en el capítulo 2. Se presenta la siguiente tabla resumen para llevar a cabo una estimación total del tráfico de datos:

<i>Servicio</i>	<i>Capacidad mínima por tren</i>	<i>Retardo extremo a extremo</i>	<i>Consumo de datos</i>
Radio de seguridad pública VoIP	64 kbps	<150 ms	Bajo
Sistema de señalización CBTC	20-40 kbps	<100 ms	Muy bajo
Sistema de información al viajero	500 kbps	<150 ms	Medio
Telemetría del tren	200 kbps	<100 ms	Medio
CCTV. Sistema de videovigilancia embarcado	2-15 Mbps por cámara * 4 cámaras por tren=60 Mbps	<150 ms	Alto
TOTAL	61 Mbps	Requisito más exigente <100 ms	Alto

Tabla 13. Estimación total del tráfico de datos

Se recuerda que los servicios orientados al cliente se cubren a través del despliegue 4G realizado por la empresa *Metrocall*. En concreto, para el caso de Línea 8 se cuenta con cobertura móvil 2G-3G desde el año 2006 y 4G desde 2016.

Para el cálculo de la tasa de datos generada por el servicio CCTV se han realizado las siguientes consideraciones:

- En cada coche de la serie 8000 1ª hay instaladas dos cámaras de videovigilancia que se irán monitoreando de forma alternativa puesto que los recursos para visualizar 8 cámaras a la vez de un solo tren desde un centro de control de tierra no serían asumibles.

- Como cada tren 8000 1ª está compuesto por cuatro coches, la radio tendrá que dar soporte a cuatro cámaras simultáneas de CCTV (se considera activa una sola cámara por coche).

Otra premisa a considerar sobre la estimación total del tráfico de datos es que los recursos de una determinada celda de la vía serán compartidos como máximo entre dos trenes que viajan en sentido opuesto (un tren circula en dirección Aeropuerto T4 a Nuevos Ministerios y el otro, de Nuevos Ministerios a Aeropuerto T4). Por lo tanto, la estimación total del tráfico de datos para una celda en la que coincidan dos trenes será:

<i>Servicio</i>	<i>Capacidad por tren</i>	<i>Retardo exigente extremo a más extremo</i>
Tren 1 circulando de Aeropuerto T4 a Nuevos Ministerios	61 Mbps	<100
Tren 2 circulando de Nuevos Ministerios a Aeropuerto T4	61 Mbps	<100
TOTAL	122 Mbps	<100

Tabla 14. Estimación total de tráfico con dos trenes coincidentes por celda

El *throughput* mínimo que debe haber disponible en todos los puntos de la línea es de 122 Mbps para poder soportar todos los servicios de dos trenes concurrentes. Esta cifra se asume que se corresponde con el mismo valor tanto para el enlace de subida, como para el de bajada, ya que se considera que los distintos servicios provocan un comportamiento simétrico de la red.

La capacidad total resultante en el peor escenario (celda que debe dar servicio a dos trenes circulando a la vez por un determinado punto kilométrico de la Línea 8) es de 122 Mbps, cantidad completamente asumible con IEEE 802.11 ac (capaz de proporcionar hasta 300 Mbps).

5.2.1 Cobertura y redundancia

El sistema TTBA se debe instalar con el objeto de dotar de cobertura inalámbrica a las siguientes zonas:

- El trazado completo de las vías por las que pueda circular un tren en Línea 8, incluyendo estaciones, túneles de enlace, etc.
- Todas las zonas de vías de circulación y estacionamiento de los trenes en su correspondiente depósito.

Además, el sistema a instalar será totalmente redundante ante un punto único de fallo de tal forma que, ante la caída o avería de un único elemento, las comunicaciones podrán seguir manteniéndose en condiciones de seguridad. Por elemento TTBA se considera:

- A cualquier estación base instalada en la infraestructura de tierra (incluyendo antenas, elementos de red y alimentación).

- A cualquier elemento instalado en la infraestructura de tierra y que sea necesario para la operación del sistema, el equipamiento de red y controladores.
- A la consola embarcada incluyendo antenas y elementos de red.

A todos los efectos, el sistema TTBA será completamente interoperable con la red integrada multiservicio actual que proporciona la red troncal del transporte de los distintos servicios de la infraestructura metropolitana.

5.2.2 Niveles de señal en IEEE 802.11ac

A continuación, y teniendo en cuenta que la tecnología seleccionada es IEEE 802.11ac, se va a definir qué se entiende por un buen nivel de señal recibida y cuál es la potencia máxima de emisión.

La potencia transmitida en la banda de 5 GHz depende de la subbanda. Como ya se ha expuesto, la banda de 5 GHz está clasificada como de uso común compartido. Esta caracterización permite que varios usuarios puedan utilizar de forma simultánea esta frecuencia respetando las normas de regulación del espectro para mitigar posibles interferencias entre emisiones. El hecho de que no sea necesario disponer de licencia no implica que la utilización en esta banda no esté sujeta a regulaciones: existen límites sobre la potencia que se puede radiar. La mayoría de las condiciones de utilización de la banda se fijan a través del Ministerio de Industria y es el CNAF el que las recoge. En estas condiciones se fijan, por ejemplo, las potencias de emisión y los protocolos que hay que utilizar en cada banda. En el caso español, las condiciones de uso compartido de la banda de 5 GHz se concretan en la nota UN-128 del CNAF. La PIRE máxima queda restringida a 200 mW entre los 5,15 y 5,360 GHz y en 1 W en la banda comprendida entre los 5,470 y 5,725 GHz, siempre que se utilicen técnicas de control de potencia soportadas por los AP. El uso de la banda entre 5,15 GHz y 5,25 GHz está reducido a instalaciones interiores [48].

<p>Banda de 5150-5250 MHz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limitada para uso en interior • p.i.r.e. máxima autorizada: 200 mW
<p>Banda de 5250-5350 MHz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limitada para uso en interior • p.i.r.e. máxima autorizada <ul style="list-style-type: none"> • 200 mW con TPC • 100 mW sin TPC • DFS activado obligatorio (norma EN 301 893)
<p>Banda de 5470 a 5725 MHz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de uso en exterior • p.i.r.e. máxima autorizada <ul style="list-style-type: none"> • 1 W con TPC • 500 mW sin TPC • DFS activado obligatorio (norma EN 301 893)

Tabla 15. PIRE máximas autorizadas en subbandas de 5 GHz [49]

Adicionalmente, se tendrán en cuenta distintos niveles de señal en función del servicio que se quiera prestar:

<i>Potencia de señal</i>	<i>Cualidad de la señal</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tipo de servicio</i>
-30 dBm	Excelente	Máxima intensidad de señal alcanzable. Escenario poco probable	-
-67 dBm	Muy buena	Nivel de señal exigido para entregas de datos muy fiables y oportunas	VoIP, VoWiFi, videostreaming
-70 dBm	Aceptable	Nivel de señal exigido para entregas de datos fiables	Email, Web
-80 dBm	Regular	Nivel de señal mínimo para conectividad básica	-
-90 dBm	Mala	Nivel de señal cercano al ruido de fondo	-

Tabla 16. Niveles de señal WiFi según [50]

5.3 Procedimiento de diseño

A todos los efectos, la red TTBA consistirá en una red de acceso radio que extenderá la Red IP Multiservicio (RIM) de Metro de Madrid al interior de los trenes.

Para el diseño de la red TTBA en la que se prestan varios servicios se deben considerar diversos factores. Resulta imprescindible tener en cuenta los requisitos de capacidad de red que requiere cada uno de los servicios y realizar un reparto efectivo a lo largo de todo el espectro disponible.

El estudio de la cobertura disponible, la intensidad de la señal en cada punto del trazado, la elección de los canales y las interferencias entre ellos, son determinantes a la hora de conseguir el mayor rendimiento de la red WiFi; no será suficiente garantizar un determinado nivel de cobertura, sino que, además, se debe realizar un diseño basado en la calidad de servicio para alcanzar un consenso entre ambos.

El primer paso (ya identificado) consiste en la definición de los servicios y los requisitos ofrecidos por la infraestructura metropolitana. Con la capacidad de rendimiento estimada para cada servicio y con las características del trazado de la línea se procederá a realizar una estimación de la capacidad radio requerida por cada AP y el número aproximado de AP. Comentar que, el área de cobertura de un AP es

inversamente proporcional a la velocidad de transmisión; es decir, a mayor área de cobertura, la velocidad de transmisión disminuye.

Con la tecnología propuesta (IEEE 802.11ac) y contemplando redundancia ante la caída de un AP para conseguir así una cobertura de la vía con capacidad de resistencia ante el fallo, con 3 canales, se estaría en disposición de continuar con el diseño. Además, se debe considerar una antena receptora en cada extremo del tren.

5.3.1 Solución de equipamiento a contemplar

A continuación, se representa un esquema con el equipamiento a contemplar en las capas física y MAC tanto en la infraestructura de tierra como en el tren, en el diseño de la red TTBA. Los recuadros marcados en naranja se corresponden con dispositivos de respaldo (*switches de backup* a los que se engancharían los AP de la otra vía y controladora de *backup*, configurada en modo HA) que se encargan de asegurar la redundancia:

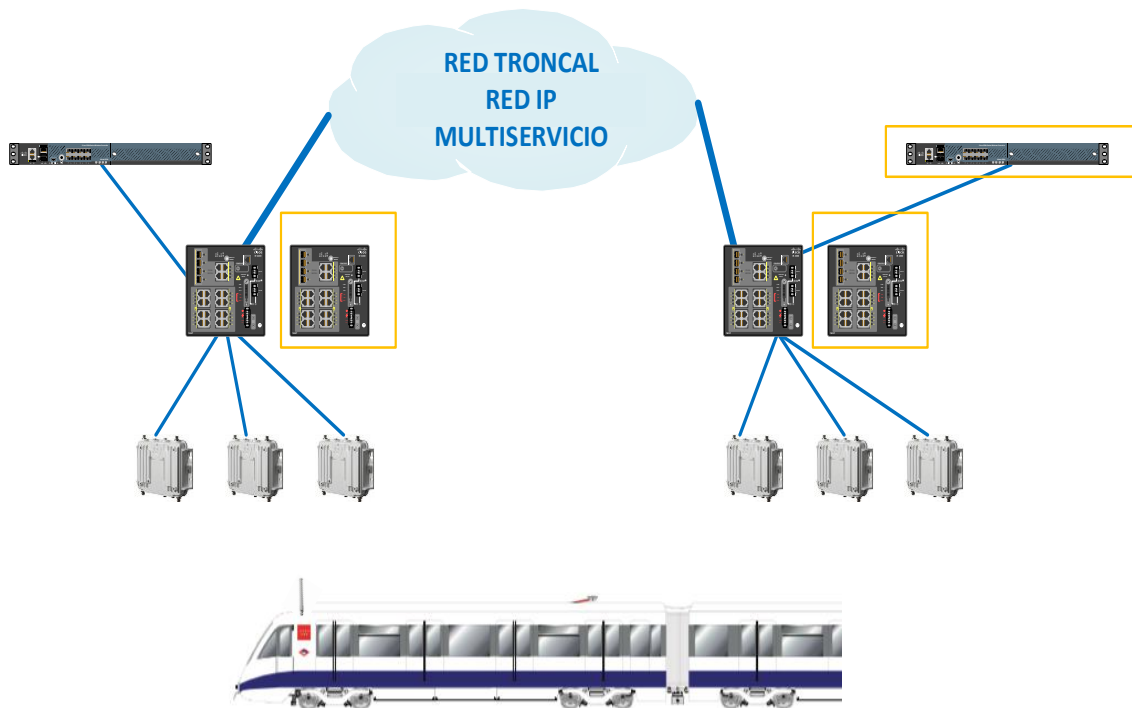


Figura 31. Equipamiento de tierra y tren de la red TTBA con elementos de Cisco [51]

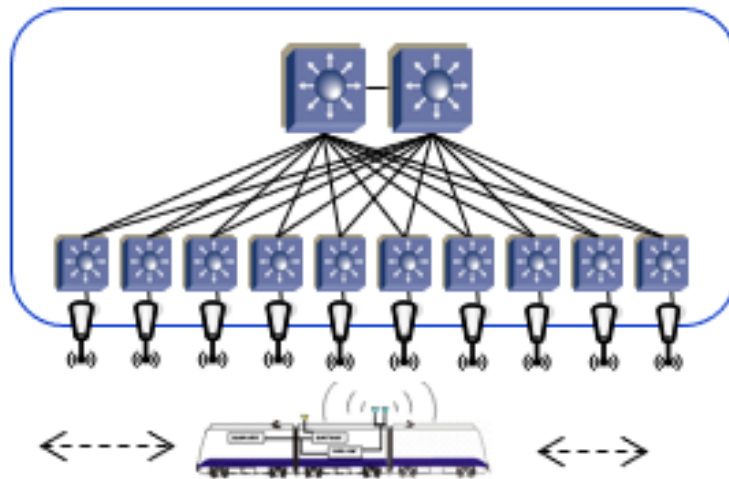


Figura 32. Esquema de la topología física de conexión en la Línea 8 basada en *switch blocks*

Del esquema propuesto se deduce que todos los equipos de los que cuelgan los AP y que dan cobertura a la vía están duplicados para asegurar la redundancia de los servicios críticos orientados a garantizar la seguridad y el movimiento del tren.

5.3.1.1 Equipamiento para la infraestructura de tierra

El equipamiento de tierra se compone de AP, controladoras y *switches*.

El AP es el dispositivo que hace de puente entre la red cableada y la red inalámbrica. Todos los puntos de acceso deben cumplir con el estándar EN 50121-5 [52]. Se propone para proporcionar cobertura a la vía, el modelo Cisco IW3702, por cumplir con los criterios del estándar referenciado. Este dispositivo se ha diseñado especialmente para entornos ferroviarios, presenta una alta capacidad y es capaz de realizar traspasos entre celdas con un retardo muy bajo.



Ilustración 6. Modelo de AP para cobertura de la vía [53]

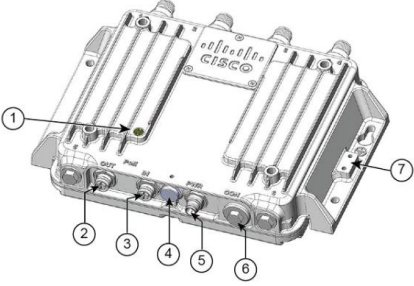
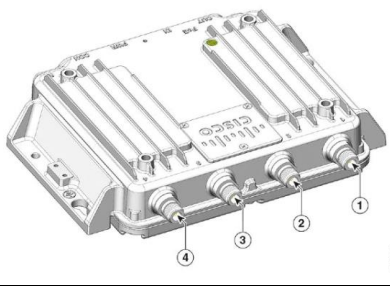
			
Vista bajera del panel de conexiones:		Vista del panel de conexiones de arriba:	
1. Estatus del LED	5. Conector de potencia	1. Puerto de antena C	
2. Puerto PoE salida	6. Puerto de consola	2. Puerto de antena A	
3. Puerto PoE entrada	7. Conexión a tierra	3. Puerto de antena B	
4. Botón de <i>reset</i>		4. Puerto de antena D	

Tabla 17. Conexiones del AP [54]

Los AP serán configurados en modo ligero de tal forma que quedarán ligados a una controladora central donde será gestionada su configuración.

El AP será el encargado de gestionar los parámetros que transcurren en tiempo real: gestión de las señales inalámbricas, cifrado y descifrado 802.11 y estado de interferencias y del medio.

Con respecto a la antena, comentar que constituye una de las partes esenciales de esta red inalámbrica ya que es la responsable de hacer llegar la señal WiFi a todos los clientes dentro del área de cobertura. Los equipos inalámbricos como el modelo de AP propuesto disponen de hasta 4 conectores para antenas. Las señales que emite el dispositivo WiFi se multiplexan en N antenas de emisión y M antenas de recepción utilizando MU-MIMO.

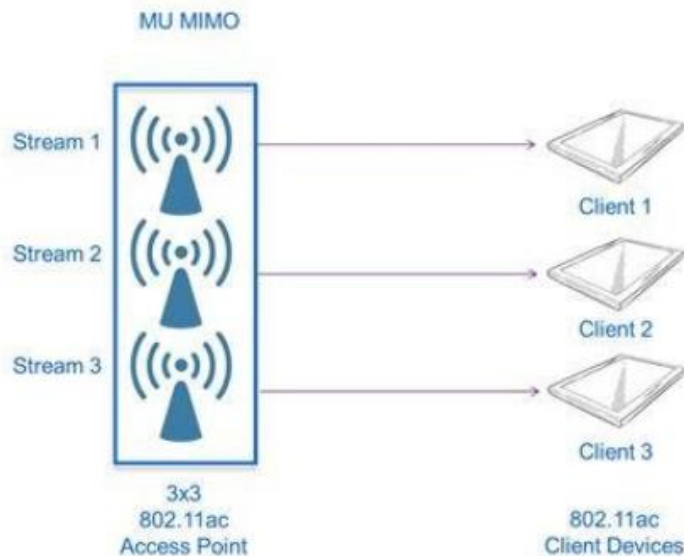


Figura 33. MU MIMO en estándar 802.11ac [55]

En la misma banda de frecuencias se transmitirán varios canales en paralelo utilizando distintas antenas. A su vez, también se podrán transmitir distintos canales por la misma antena si se tiene suficiente ancho de banda o es una antena multibanda.

Se debe tener especial cuidado a la hora de elegir el tipo de antena a considerar en el despliegue. Los criterios que se deben tener presentes antes de realizar la selección son:

- La ubicación final de la antena.
- La polarización.
- El tipo de antena deseada (direccionales u omnidireccionales).

El tipo de antena con el que se equipará el AP en vía, será el AIR-ANT2547V-N, del que se detallan las especificaciones técnicas y los diagramas de radiación obtenidos de las hojas de características que proporciona el fabricante:


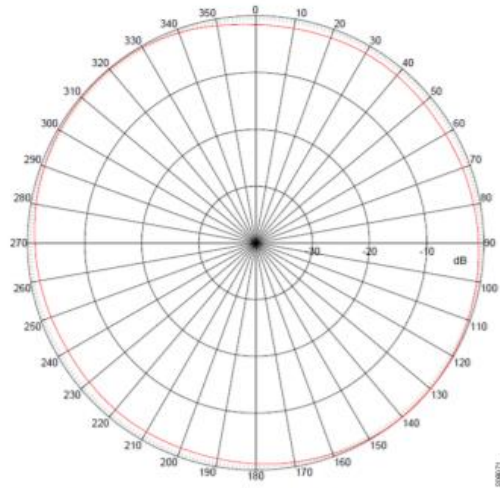
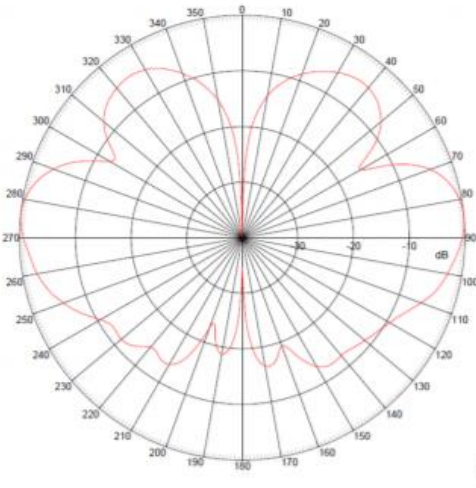
Antenna type	Omnidirectional colinear array	
Operating frequency range	2400–2483 MHz; 5150–5875 MHz	
2:1 VSWR bandwidth	2400–2483 MHz; 5150–5875 MHz	
Nominal input impedance	50Ω	
Gain (2400–2483 MHz)	4-dBi	
Gain (5250–5875 MHz)	7-dBi	
Polarization	Linear	
E-plane 3-dB beamwidth	30° for 2.4-GHz; 14° for 5-GHz	
H-plane 3-dB bandwidth	Omnidirectional	
Length	11.1 in. (28.2 cm)	
Diameter	1.25 in. (3.17 cm)	
Weight	6.0 oz. (170.0 g)	
Connector type	N-Male	
Operating temperature	–40° to 185°F (–40° to 85°C)	
Water/Foreign Body Ingress	IP66, IP67	
Wind rating	100 mph (161 kph) operational 165 mph (265 kph) survival	

Tabla 18. Especificaciones técnicas de la antena [56]

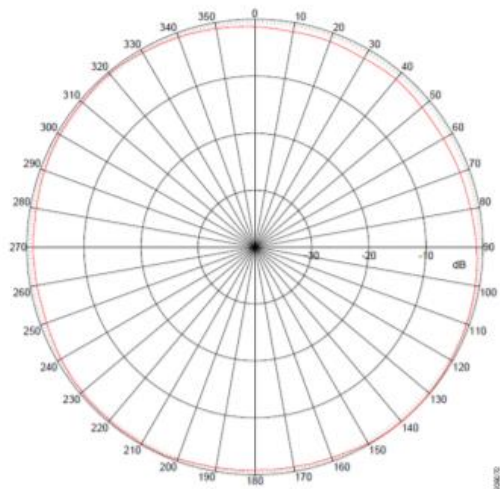
Azimuth Radiation Pattern (2.4 GHz)



Elevation Radiation Pattern (2.4 GHz)



Azimuth Radiation Pattern (5 GHz)



Elevation Radiation Pattern (5 GHz)

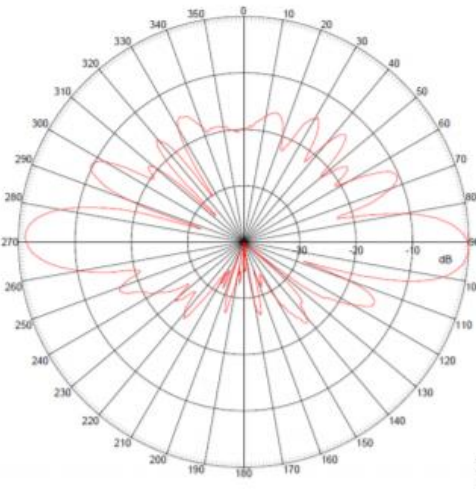


Figura 34. Patrones de radiación de la antena [56]

Aparte de los AP y de las antenas, es necesario contar con un elemento denominado controladora. La controladora asume tareas relacionadas con: la autenticación y la asociación de usuarios, la gestión de la QoS y la seguridad, los trasposos, la gestión de canales RF y de la conexión desde y hacia la red de distribución en la VLAN que corresponda.

Los AP se van a comunicar con la controladora a través de un protocolo denominado CAPWAP: el AP va a encapsular todas las tramas de datos IEEE 802.11 recibidas de un cliente en una trama del tipo CAPWAP.

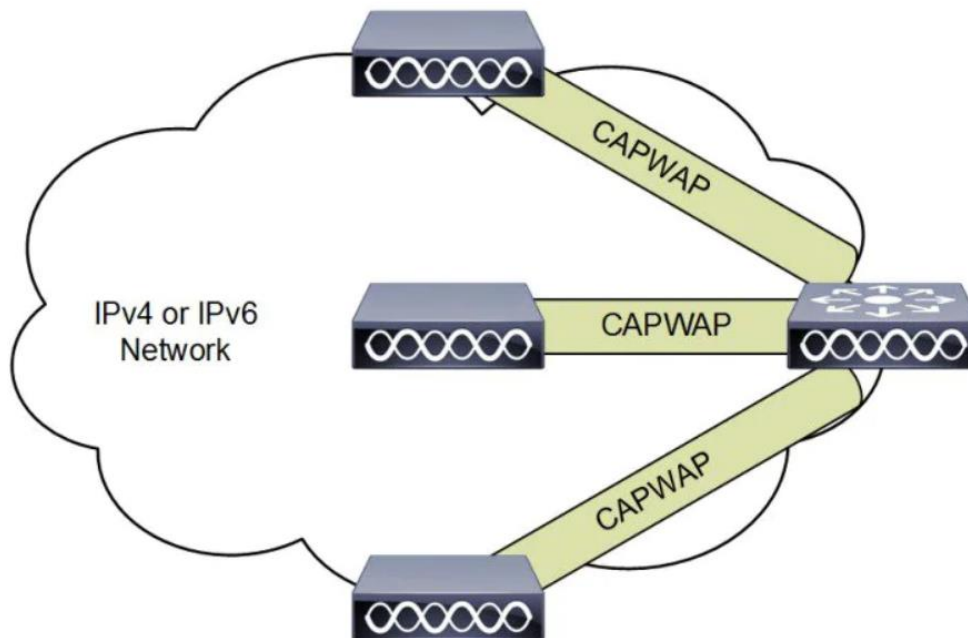


Figura 35. CAPWAP establecido entre los AP conectados a una controladora [57]

La controladora está constantemente examinando las características de todos los AP y ejecuta acciones a nivel de todo el sistema: tiene la capacidad de disminuir la potencia de cada AP o aumentarla, cambiar el canal de un AP para evitar interferencias y puede realizar un balanceo de carga de clientes entre los AP.

El modelo de controladora que se selecciona es capaz de soportar hasta 1500 AP y 20.000 clientes y es compatible con el modelo de AP propuesto: se trata de una controladora de la serie 5520, especialmente optimizada para 802.11ac.



Ilustración 7. Modelo de controladora Cisco 5500 [58]

Por último, los *switches* serían los elementos que cerrarían el listado de dispositivos principales que componen el equipamiento de tierra. El modelo de *switch* propuesto para la infraestructura a desplegar en la vía es el IE-4000, apto para conectar AP tanto 802.11n como 802.11ac. A continuación, se representan en un esquema muy visual, las distintas indicaciones que da el fabricante a la hora de tener que decantarse por un modelo u otro dentro de la gama IE4000:

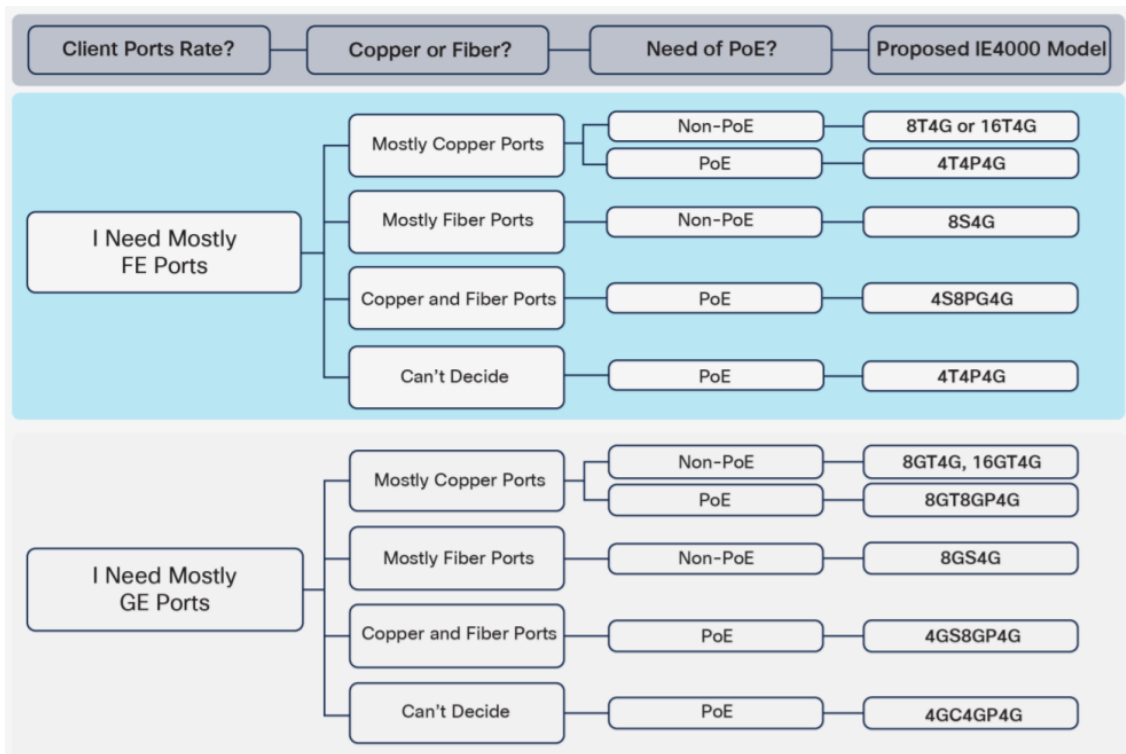


Figura 36 . Criterios de selección de modelo de *switch* dentro de la gama IE4000 [59]



Ilustración 8. Modelos disponibles dentro de la gama IE4000 [59]

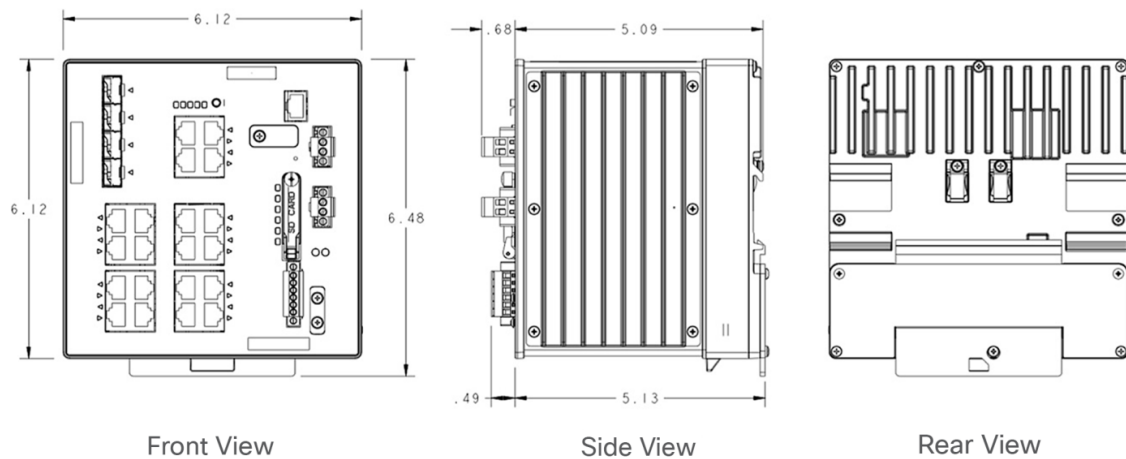


Figura 37. Dimensiones mecánicas del *switch* IE4000 (vista frontal, lateral y trasera) [59]

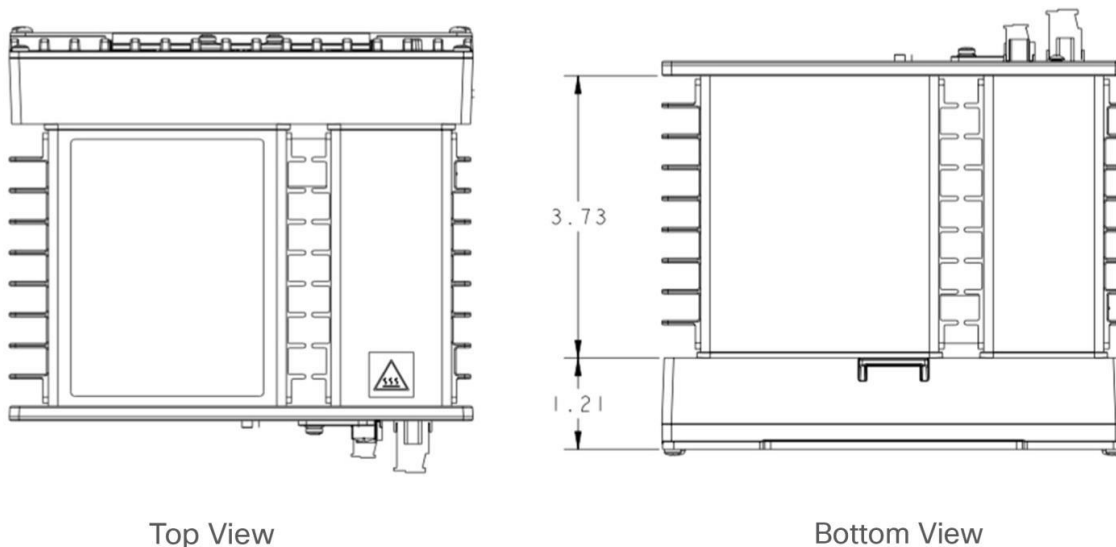


Figura 38. Dimensiones mecánicas del switch IE4000 (vista superior e inferior) [59]

En los switches se configuran todas las VLAN de nivel 2 estableciendo los debidos niveles de prioridad (cuando más alto el número, mayor la prioridad). La misión de los switches es propagar cada VLAN por la red, abarcando desde la controladora hasta los AP. En la siguiente tabla podemos apreciar una propuesta de prioridades en función de la criticidad del servicio transportado:

VLAN	Servicio desplegado	Prioridad del servicio
100	Gestión de red	150
101	CBTC	130
102	VoIP	110
103	CCTV	90
104	Telemetría del tren	70
105	Sistema de Información al Viajero	70

Tabla 19. Prioridad definida en función de la criticidad del servicio

Los switches se desplegarán en una topología en anillo (colocados por interestación en cada lado de la vía, estableciendo los correspondientes enlaces con los switches de la capa de acceso con los que ya cuentan las estaciones). Las estaciones base de cada hastial quedarán redundadas atendiendo al siguiente esquema (por claridad, la cobertura de la EB se ha representado por cada vía, aunque lógicamente, cada par de EB enfrentadas, dan cobertura a la misma zona, de tal forma que si la EB con canal 100 falla, automáticamente se traspasa al canal 112 y así sucesivamente):

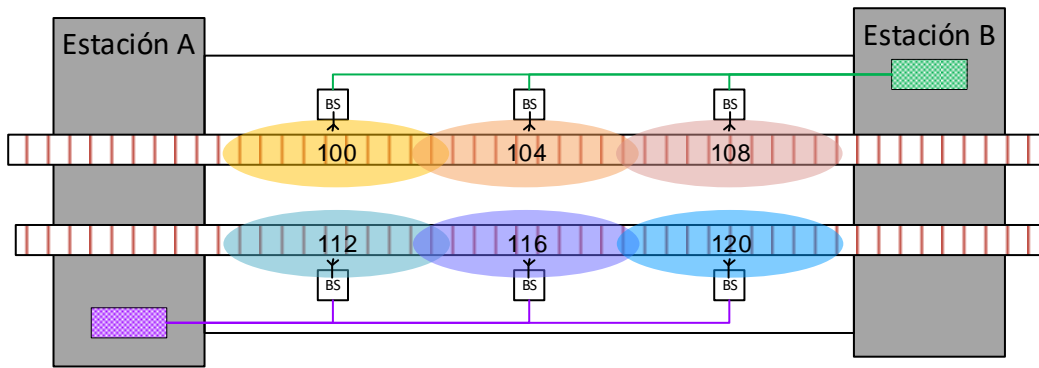


Figura 39. Redundancia de cobertura de estaciones base

Con respecto al cableado entre equipos, se desplegará cableado UTP cuando el equipamiento a cablear se encuentre a menos de 100 m del *switch* y si sobrepasa esta distancia, se utilizará FO (fibra óptica).

5.3.1.2 Equipamiento embarcado

Cada unidad de tren se debe equipar con una EB similar a la que se instala en la infraestructura de tierra que permitirá establecer un enlace en modo “*Bridge*” desde su EB embarcada con las EB fijas. Al ir en movimiento, la EB del tren irá haciendo *roaming* según vaya cambiando de zona de cobertura de una EB a otra. Las EB se integran con antenas montadas en el techo del tren y conectadas mediante cables coaxiales al transceptor de la EB.

Para la red embarcada se propone una topología en anillo que una los coches y que permita conectar los servicios a dicha red. Los gestores de comunicaciones de los coches M quedarán comunicados por el interior del tren a través de una red LAN que será la que proporcione la interfaz externa para los servicios de aplicación.

En los siguientes esquemas, se pueden visualizar los elementos que conforman el equipamiento embarcado:

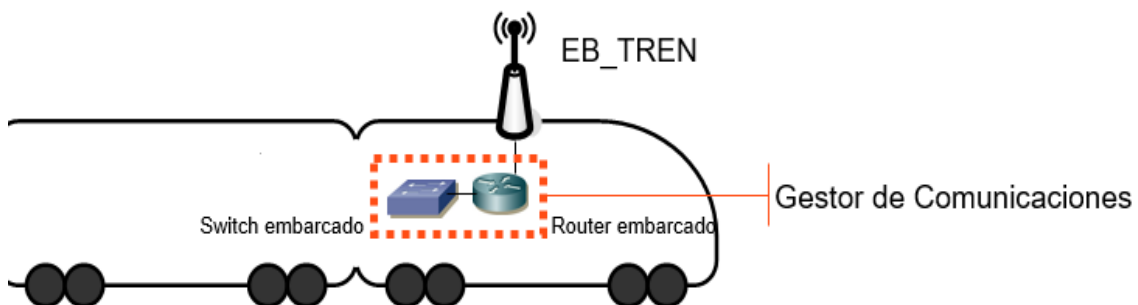


Figura 40. EB embarcada en la cabina del tren (coche M)

La comunicación de los dispositivos que apartan la información de diagnóstico (telemetría del tren) se realiza a través del bus de datos MVB (*Multiple Vehicle Bus*). En la solución embarcada se incluirá toda la electrónica adicional que permite la adaptación mediante una pasarela (*Gateway*) entre la red Ethernet y el bus MVB:

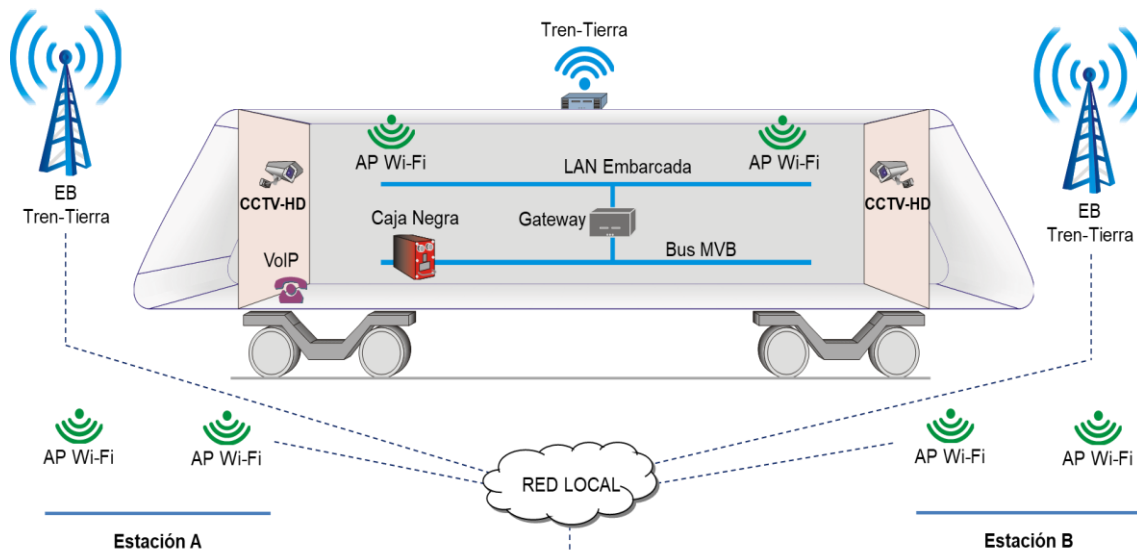


Figura 41. Comunicaciones inalámbricas tren-tierra

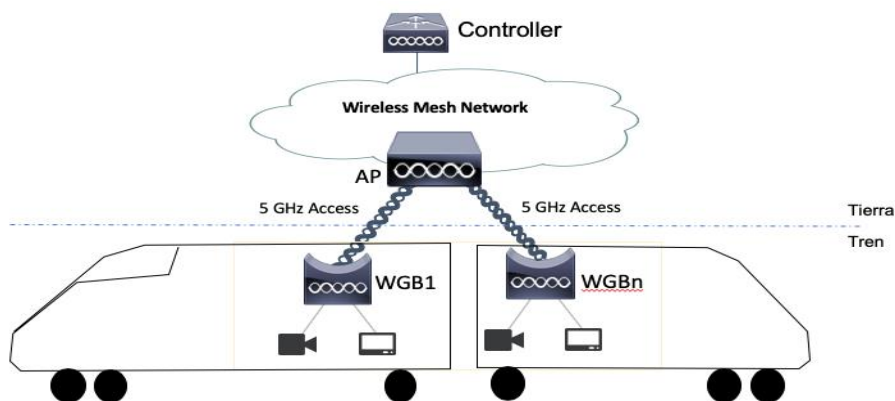


Figura 42. AP embarcados configurados en modo WGB (clientes de AP de tierra)

5.4 Simulaciones

En este apartado estaba previsto llevar a cabo un conjunto de simulaciones del escenario en cuestión con la herramienta *EkaHau Site Survey*. No obstante, debido a la situación de confinamiento actual motivada por la crisis de la COVID-19, que ha provocado que el 85% de este trabajo se desarrolle en estas circunstancias, no ha sido posible acceder al PC en el que se encuentra instalado el *software*. No obstante, se va a describir cuál sería el proceso a seguir, ilustrando con diferentes figuras y esquemas cómo implementar el entorno, dejando entrever el potencial que proporciona esta herramienta.

Todas las figuras se han obtenido de la versión gratuita disponible en la página Web de *EkaHau*, aunque en dicha versión sin licencia, no están disponibles los módulos que se requieren para acometer el estudio de la cobertura en el túnel propuesto.

La herramienta de *software* de *EkaHau Site Survey* está pensada para profesionales de redes WiFi y del sector de las TI que precisan optimizar el tiempo de análisis en sus proyectos [60].

Algunas de las características más relevantes que permite la herramienta son:

- Compatible con las soluciones WiFi disponibles en el mercado.
- Importación de planos de mapas de red en 3D.
- Recursos de simulación y diseño de redes inalámbricas con una gama de equipos de diversos fabricantes.
- Planificación de la expansión de una red.
- Detección y localización de interferencias no provenientes de WiFi. Es capaz de medir interferencias en el ambiente y atenuaciones por causa de los obstáculos.

La herramienta está concebida para entornos menos hostiles que la vía férrea de un tren metropolitano, pero mediante la creación de materiales específicos con atenuaciones adaptadas para este entorno se van a poder realizar las simulaciones objetivo.

Para la realización del estudio de la infraestructura de la vía se empezaría por analizar un tramo recto del recorrido de la Línea 8, seguidamente, se analizaría un tramo curvo, y, con los resultados de ambos escenarios, se extrapolarían las cantidades obtenidas al total del trazado.

El trazado recto que se propone analizar es el comprendido entre el punto kilométrico 24+000 y el 25+000 (1 km de trazado) y que se encuentra entre las estaciones de Feria de Madrid (antes llamada Campo de las Naciones) y Aeropuerto T1-T2-T3:

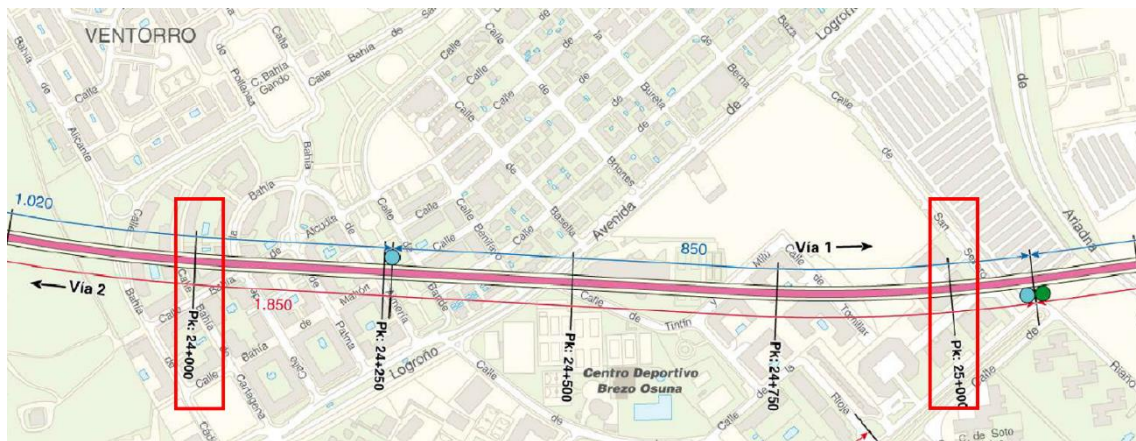


Figura 43. Tramo recto de Línea 8 de 1 km [45]

Para comenzar a trabajar sobre un nuevo diseño, en primer lugar, se debe cargar el mapa del área física o zona que se quiere cubrir con conectividad WiFi (túnel recto). La interfaz que presenta el programa con el mapa cargado es la siguiente:

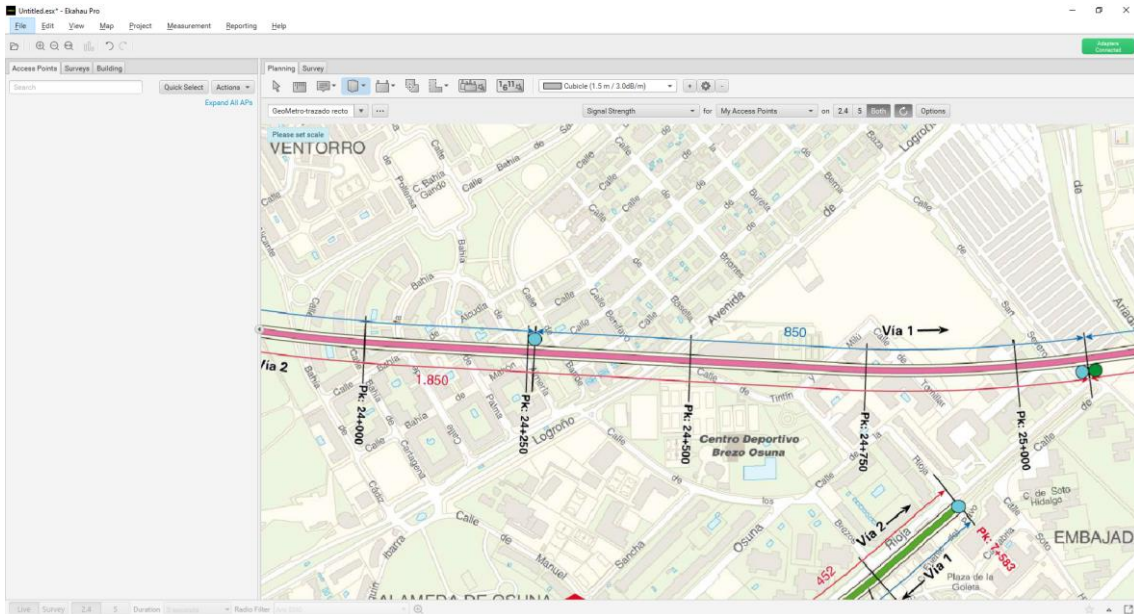


Figura 44. Interfaz del programa Ekahau

Una vez que se ha cargado el mapa deseado sobre el que se desea instalar la infraestructura inalámbrica, se debería establecer la escala adecuada de tal forma que las distancias fueran reales y las aproximaciones de cobertura resultaran lo más certeras posibles.

Para poder realizar la simulación del túnel se procedería a crear un material específico a partir de uno ya existente en la herramienta y que consistiría en un muro de hormigón con una atenuación muy fuerte (48 dB) y se definiría un suelo y un techo con una atenuación todavía mayor (60 dB). Las medidas del túnel se van a corresponder con las medidas de los túneles de gálibo ancho ya que es el caso que aplica a la Línea 8: ancho de 7.74 m y alto de 6.87 m [61]. En la siguiente figura se observa el material a crear para la simulación de los muros del túnel:

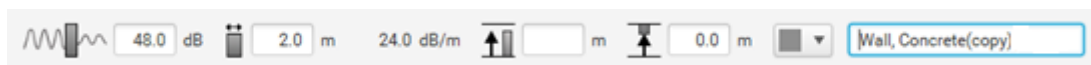


Figura 45. Definición de los muros del túnel con Ekahau

Con el túnel ya definido sobre el mapa se continuaría con la identificación de la zona de cobertura sobre la que se van a situar los trenes. Para el tramo considerado, se realizaría la suposición de que hay dos trenes en esa zona (un tren por cada sentido). Considerando los valores de capacidad por tren y con la salvedad de que cada tren debe estar cubierto por dos AP en cada punto del recorrido, los requisitos que se deberían fijar con Ekahau para garantizar la cobertura del tren serían:

Requirement		Train		Delete	Add	Make Default
Criteria	Signal Strength	Min	-67 dBm			
	Signal-to-noise Ratio	Min	15 dB			
	Data rate	Min	61 Mbps			
	Number of Access Points	Min	2 at min.			-67 dBm
	Channel Overlap	Max	1 at min.			-75 dBm
	Round Trip Time (RTT)	Max	200 ms			
	Packet Loss	Max	0 %			

Figura 46. Definición de requisitos de cobertura del tren en *Ekahau*

Name	Area-1		▼
Coverage profile	Voice + Data		
Devices	Total 2 devices		total bitrate 122 Mbps
	Add devices		
	-	2	+
	Train		▼
	802.11ac 1x1:1 20MHz		
	Train		▼
			Delete

Figura 47. Definición del área con el consumo de datos de dos trenes en *Ekahau*

A continuación, se configurarían los AP de la serie 3700 para que emitan la máxima PIRE permitida (36 dBm), asegurando un área de máxima cobertura y forzando a utilizar el mínimo número de AP posible.

⚡	790 mW	(EIRP: 35.98 dBm)	ℹ	↑	4.20 m	↻	90.0 °	📶	90°	E
									90°	-90°
📶	📶	Cisco IW3702e + AIR-ANT2547V-N 5GHz		▼						
Supported Spatial Streams		3		<input checked="" type="checkbox"/> Short Guard Interval						

Figura 48. Parámetros de configuración del AP en *Ekahau*

Según los datos que se aprecian en la Figura 48, el AP se debería situar a una altura no superior a la indicada en el parámetro de configuración expuesto (4.2 m): debe colocarse por encima de la altura total del tren (aproximadamente 3.9 m), pero no más arriba ya que la catenaria provocaría fuertes interferencias sobre la señal y se debe evitar este fenómeno. Otro parámetro a considerar es el giro que se debería indicar para el AP que iría sobre la pared para conseguir que emita en la dirección de la vía.

No se consideraría la ganancia de la antena receptora del tren ya que *Ekahau* no tiene la opción de añadirla.

Una vez configurado el AP y localizada el área de cobertura se podría comenzar a realizar una evaluación profunda del nivel de la señal recibida, colocando un número de

AP que verifiquen un nivel de señal adecuado. Como es lógico, el nivel de señal más bajo se va a obtener en el punto medio entre dos AP. Si en este punto se consiguen dos señales de canales diferentes por encima de los -67 dBm (se recuerda que este valor se corresponde con el nivel de señal exigido para entregas de datos muy fiables y oportunas como VoIP, servicio de voz crítica que se ha identificado como el tercer servicio en la escala de prioridades) significaría que se cumple la condición de redundancia.

La herramienta permite visualizar la segunda señal más fuerte de los AP dispuestos sobre el mapa a través del menú "Options", permitiendo identificar los tramos de solapamiento y pudiendo comprobar así la redundancia de la infraestructura:

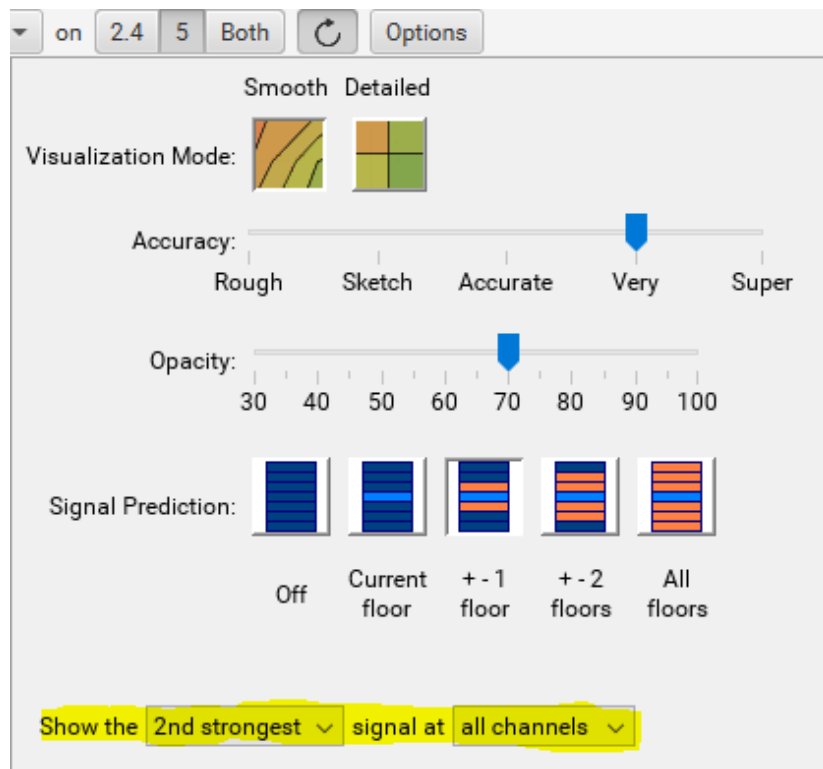


Figura 49. Menú "Options" del programa Ekahau

En este punto se hace un inciso para destacar un hecho relevante: la zona de solapamiento entre celdas debe ser menor que la longitud total del tren (73.5 m). Así, un buen diseño tendría en cuenta un margen de error para que dicha distancia ronde los 60 m. Si en estas zonas se logra obtener dos señales que superen el umbral de los -67 dBm, se podría dar por válido el diseño con el número de AP considerado ya que la redundancia de cobertura sobre el tren estaría cubierta siempre por 2 AP en todos los puntos de la vía.

El programa permite analizar las interferencias ocasionadas por el nivel de ruido (si se encontrara entre los -90 y los -95 dBm, al estar la señal bastante por encima, no se consideraría su afección), las interferencias cocanal, la relación señal a ruido y la velocidad de los datos y el *throughput* resultante. Con el resultado que se obtuviera para el *throughput* se comprobaría si se pueden cubrir todos los servicios correspondientes a los dos trenes.

Para el trazado recto y según criterios análogos a los empleados en otras infraestructuras de características semejantes, se va a suponer que cada AP se instala a una distancia de 500 m. Como aproximadamente el 50% del trazado completo de Línea 8 presenta un trazado recto, se considerarían alrededor de 17 AP a desplegar en los tramos rectos (por cada lado de la vía para asegurar la redundancia).

El siguiente paso, sería hacer un estudio análogo al anterior, pero en vez de escoger un tramo recto del trazado, se seleccionaría un tramo en curva.

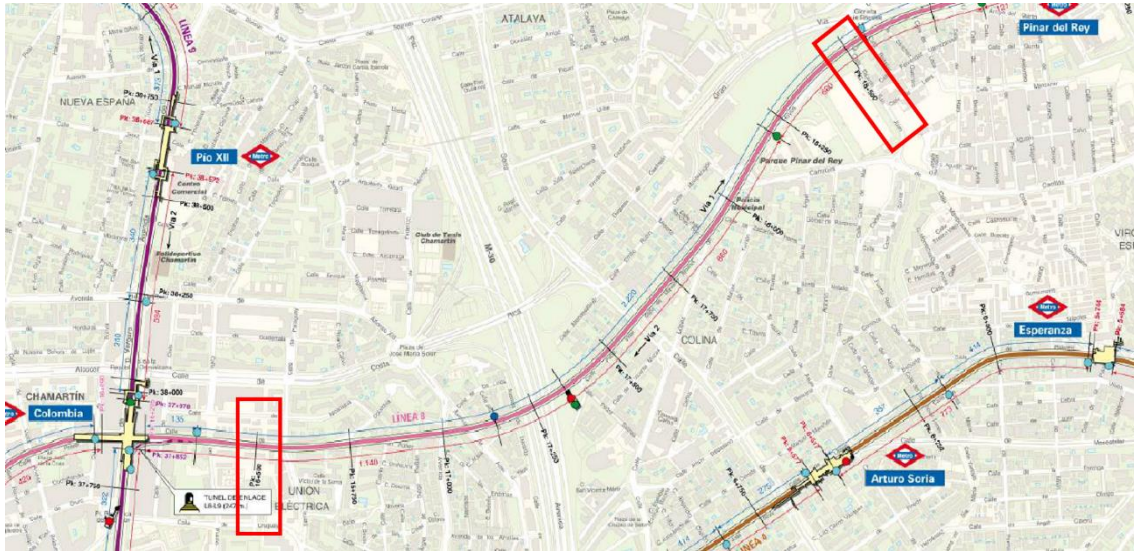


Figura 50. Tramo curvo de Línea 8 de 2 km [45]

En este caso, debido a la pérdida de LOS, es razonable considerar que se van a precisar más AP y a una distancia menor (cuanto más cerrada sea la curva, mayor será el número de AP a desplegar). Basándose en otras infraestructuras de estas características se instalarán AP cada 250 m. Como quedaba por cubrir el otro 50% de la Línea 8, para este tipo de trazado se van a desplegar 33 AP (por cada lado de la vía para asegurar la redundancia).

Adicionalmente, se podría realizar un estudio sobre el efecto de apantallamiento que provocarían dos trenes coincidentes en un tramo (previsiblemente se perderá redundancia en algunos puntos y aumentará la distancia entre las zonas de solapamiento). En función de los resultados habrá que considerar acercar los AP unos metros adicionales. Otro estudio que se podría contemplar es el del análisis de la cobertura en una estación de la Línea 8 con dos trenes coincidentes (Línea 8 ya cuenta con cobertura WiFi de estaciones, y, por lo tanto, no es necesaria la inversión en estas dependencias).

Una vez validadas todas las simulaciones, con la comprobación del cumplimiento de los niveles de señal esperados y la redundancia asegurada, el siguiente paso consistiría en realizar el despliegue sobre la línea, procediendo a verificar los niveles de señal reales y realizando los ajustes necesarios in situ, acercando o alejando los AP en función de las características que el trazado permita.

5.5 Valoración económica del proyecto

La inversión se debe realizar considerando en todo momento que el sistema TTBA podrá mantenerse en servicio durante un tiempo de al menos 15 años. Durante este tiempo, se realizarán las tareas de mantenimiento predictivo y correctivo necesarias para el mantenimiento del servicio.

El detalle de la valoración económica para el equipamiento de tierra, se puede apreciar en la siguiente tabla. Los datos aportados se han consultado en [62], considerando que, para una instalación de estas características se puede aplicar un 30% de descuento sobre el precio de lista y que con ese porcentaje, ya se incluyen todos los costes correspondientes a la configuración, la instalación (cableado y conexión) y a los servicios profesionales oportunos.

Equipamiento	Coste unitario	Cantidad	Precio total
AP	1.946	50	97.300
Antenas	210	100	21.000
Controladora	14.145	1	14.145
Switches	3.710	50	185.500
Total			317.945 €
Sistema redundando			635.890 €

Tabla 20. Valoración económica equipamiento de tierra

Para la parte embarcada el desglose sería el siguiente:

Equipamiento	Coste unitario	Cantidad por tren	Precio total
AP	1.946	2	3.892
Antenas	210	2	420
Switches	3.710	2	7.420
Total			11.732 €
Total (14 trenes)			164.248 €

Tabla 21. Valoración económica equipamiento embarcado

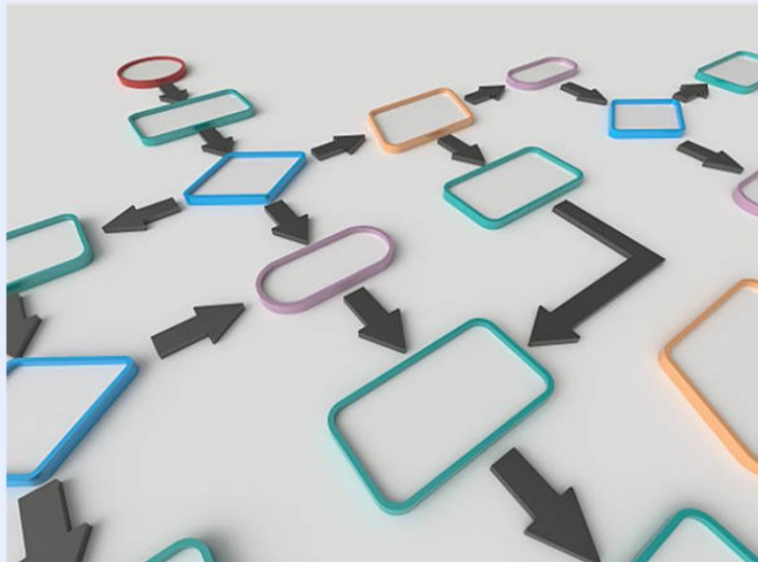
Por último, la tabla resumen del presupuesto base de licitación (que incluye el presupuesto de ejecución material, los gastos generales de la empresa y el beneficio industrial, sin I.V.A) y el total con el I.V.A. incluido:

RESUMEN DE PRESUPUESTOS		
CAPÍTULO 1:	INSTALACIÓN EN TIERRA	635.890 €
CAPÍTULO 2:	INSTALACIÓN SISTEMAS EMBARCADOS	164.248 €
	PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN (sin I.V.A.)	800.138 €
I.V.A. (21%)		168.028,98€
TOTAL		968.166,98 €

Tabla 22. Desglose resumen de presupuestos

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES



6. Conclusiones

Descripción de las conclusiones del trabajo: lecciones aprendidas

Una de las principales conclusiones aprendidas tras la realización del trabajo, es que los túneles para el transporte metropolitano son sinónimo de un medio lleno de retos que se deben afrontar y superar en términos de propagación de señales radio. Se trata de ambientes hostiles a la hora de plantear el despliegue de un sistema de comunicaciones inalámbrico.

Entre los aspectos que más limitadores resultan al afrontar un diseño de estas características, se encuentran las restricciones impuestas por la movilidad y la cobertura. La presencia constante de los túneles conlleva a que fenómenos como el multitrayecto, se vean intensificados. Tampoco favorece el trazado natural de las líneas (la presencia de curvas, bifurcaciones, etc.), ni la estructura metálica de la que están hechas las cajas de los trenes (dificultan la penetración de la señal en el interior del vehículo).

Por lo tanto, el campo de las radiocomunicaciones en la industria ferroviaria está en constante evolución y los esfuerzos por encontrar soluciones novedosas, dotadas de mayores prestaciones y mejoras que logren mitigar todas las barreras mencionadas, son notables y sólidos.

Adicionalmente, este sector se encuentra fuertemente impulsado por la necesidad de focalizar los medios de transporte hacia modelos eficientes y sostenibles. Para lograrlo, resulta imprescindible ir migrando hacia tecnologías cada vez más avanzadas y sofisticadas que sean capaces de dar respuesta a todos los servicios de misión crítica como pueden ser la seguridad y la operación del tren y a servicios orientados a incrementar el grado de satisfacción de los clientes a bordo. La solución tecnológica que contemple la integración de todos estos servicios debe ser un sistema de banda ancha capacitado para ofrecer cobertura en todo el trazado y los recursos suficientes para transmitir las señales correspondientes a los distintos equipos embarcados en el tren.

Como posibles tecnologías disponibles en el mercado sobre las que definir un sistema tren-tierra de banda ancha se han estudiado tanto LTE como el estándar 802.11, argumentando tanto las limitaciones presentes en cada una como sus bondades. Se ha podido verificar que la enmienda ac del estándar 802.11 ofrece buenas prestaciones en cuanto a tasa de datos, logrando unas velocidades nominales más que suficientes para los objetivos propuestos y, además, permite hacer uso de varios canales distintos para las estaciones base logrando aumentar la flexibilidad del sistema. Una de las limitaciones de esta enmienda que opera en la banda de 5 GHz, es que existe una regulación sobre la emisión de potencia que limita de forma considerable el alcance de una estación base. Este hecho, junto con la importancia de tener redundancia en la cobertura y en todos los equipos para asegurar los servicios de misión crítica fundamentalmente, va a impactar en la inversión económica que se debe acometer a la hora de realizar el despliegue de las estaciones base en la infraestructura de tierra.

Reflexión crítica sobre el logro de los objetivos planteados inicialmente

Con respecto a los objetivos planteados en la introducción del trabajo, mencionar que se han podido seguir en el orden propuesto, lo que ha facilitado enormemente la comprensión de los factores que se deben tener en cuenta al proponer el diseño de un sistema de comunicaciones tren-tierra de banda ancha. Quizás, el único punto que no se ha podido desarrollar de la forma inicialmente prevista, ha sido el siguiente: “*Realizar el diseño del sistema de comunicaciones inalámbricas de banda ancha capaz de dar soporte a todos los servicios que deben ser ofrecidos en un tren de metro*”. Dicho punto, englobaba la ejecución de unas simulaciones prácticas con la herramienta de diseño de redes WiFi *EkaHau*, que finalmente y producto de la situación de confinamiento en la que se ha desarrollado este trabajo, no ha sido posible abordarla. No obstante, se han indicado todas las pautas a seguir para realizar una simulación de esta índole, proporcionando material suficiente para poder profundizar en el potencial ofrecido por el programa *EkaHau*.

Análisis crítico del seguimiento de la planificación y metodología

Con respecto a la planificación, metodología y seguimiento del trabajo, indicar que el diagrama de Gantt propuesto ha supuesto una contribución positiva para organizar las actividades, la dedicación y la carga horaria. De esta forma, el diagrama se ha utilizado como guía orientativa de tiempos y, si bien algunas tareas se han flexibilizado y reorganizado para realizar ajustes producto de alguna desviación puntual, en líneas generales, casi todas las tareas se han podido llevar a cabo en los plazos previstos.

Líneas de trabajo futuro

Como propuesta a futuro y una vez que se haya podido profundizar en el manejo y posibilidades que ofrece la herramienta *EkaHau*, se podrían depurar los distintos escenarios hasta alcanzar los objetivos deseados. A continuación, sería mandatorio proceder a realizar un estudio in situ, tomando medidas reales con el módulo *EkaHau Site Survey* y comprobando si se aproximan los resultados reales a los resultados obtenidos en las simulaciones teóricas: se podría observar cómo varía el ruido, la SNR, la velocidad de los datos, etc., para ajustar y definir finalmente, el número exacto de AP necesarios para el equipamiento de tierra.

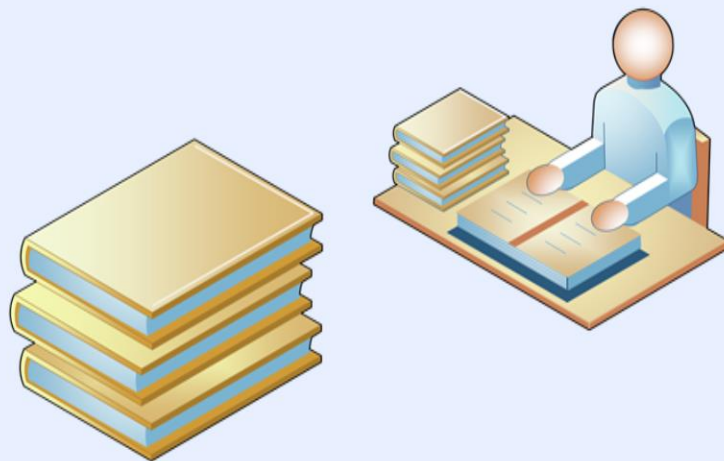
Por otra parte, como líneas de investigación a futuro, se proponen diferentes temáticas con las siguientes materias a desarrollar:

- Investigación sobre la propagación en túneles: estudiar y explorar diseños de antenas específicas para entornos ferroviarios que posibiliten y mejoren las comunicaciones tren-tierra (ahondar en aspectos relativos a la ubicación de la antena y la influencia del tren).
- Investigación sobre los sistemas multiantena: medición de MU-MIMO en túneles y estudio de las posibles aplicaciones, modelado del canal MIMO e impacto de la técnica de *beamforming* en escenarios de alta velocidad.
- Estudios relacionados con la movilidad y los traspasos entre celdas para mejorar la calidad del servicio y la eficiencia: gestión de la movilidad, planificación, traspasos y estrategias que permitan optimizar todos estos procesos.

- Estudios exhaustivos sobre la propagación tren-tierra en alta velocidad, que incorporen los efectos derivados de la velocidad, la influencia del material móvil a diversas frecuencias de interés y que tengan en cuenta la variedad de escenarios posibles (túneles, trazados en exterior, etc.).
- Evolución de las comunicaciones tren-tierra hacia comunicaciones tren-tren (vehículo a vehículo, V2V).
- Evolución hacia el paradigma del “IoT” de 5G: aprovechar y obtener el máximo rendimiento de los datos recolectados por dispositivos de sensorización.
- Seguimiento de la evolución de las tecnologías 5G y 802.11ax (WiFi 6), que aumentarán la capacidad para transmitir datos y presentarán importantes mejoras en términos de movilidad.

CAPÍTULO 7

GLOSARIO



7. Glosario

Listado de acrónimos

Acrónimo	Significado
1G	Primera Generación
2G	Segunda Generación
3G	Tercera Generación
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	Cuarta Generación
5G/5G NR	Quinta Generación/ <i>5G New Radio</i>
AUC	<i>Authentication Center</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
C-RAN	<i>Cloud-Radio Access Network</i>
CAPWAP	<i>Control and Provisioning of Wireless Access Points</i>
CBTC	<i>Communications-Based Train Control</i>
CCTV	Circuito Cerrado de Televisión
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CNAF	Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i>
E-UTRAN	<i>Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
EB	Estación Base
EDGE/EGPRS	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
EIR	<i>Equipment Identity Center</i>
EIRENE	<i>European Integrated Railway Radio Enhanced Network</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
eMTC	<i>Enhanced Machine Type Communication</i>
eNB	<i>E-UTRAN Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
FDD	<i>Frequency-Division Duplexing</i>

Acrónimo	Significado
FDMA	<i>Frequency Division Media Access</i>
FO	Fibra óptica
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
GSM-R	<i>Global System for Mobile Communication - Railways</i>
GMSC	<i>Gateway Mobile Switching Center</i>
HA	<i>High Availability</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
IMT-A	<i>International Mobile Telecommunications -Advanced</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IR	<i>Infrared</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>ITU Radiocommunication Sector</i>
LED	<i>Light-emitting Diode</i>
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>LTE -Advanced</i>
LTE-U	<i>LTE -Unlicensed</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MORANE	<i>Mobile Radio for Railways Networks in Europe</i>
MRM	Motor con cabina-Remolque-Motor con cabina
MS	<i>Mobile Station</i>
MSC	<i>Mobile Switching Center</i>
MSRM	Motor con cabina-Motor sin cabina-Remolque-Motor con cabina

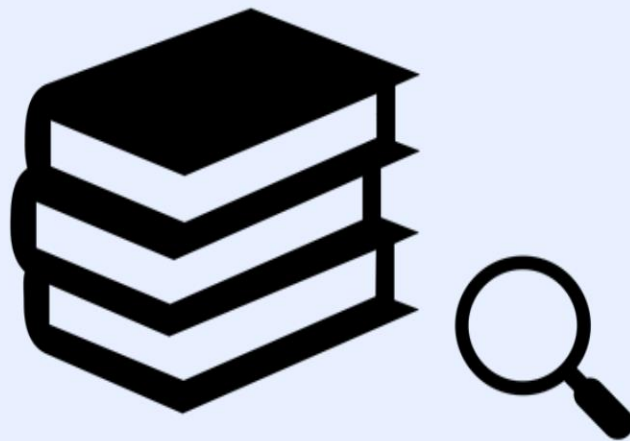
Acrónimo	Significado
MU-MIMO	<i>Multiuser-MIMO</i>
MVB	<i>Multiple Vehicle Bus</i>
NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
NLOS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PCU	<i>Packet Control Unit</i>
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
PoE	<i>Power over Ethernet</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RCN	<i>Radio Network Controller</i>
RF	Radiofrecuencia
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier-Frequency Division Multiple Access</i>
SDN	<i>Software-defined Networking</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SW	<i>Software</i>
TDD	<i>Time-Division Duplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Media Access</i>
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
TI	Tecnologías de la Información
TTBA	Tren Tierra de Banda Ancha
UE	<i>User Equipment</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable Low-Latency Communication</i>

Acrónimo	Significado
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
V2V	<i>Vehicle to vehicle</i>
VHT	<i>Very High Throughput</i>
VLR	<i>Visitor Location Register</i>
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WGB	<i>Work Group Bridge</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLC	<i>Wireless LAN Controller</i>

Tabla 23. Desglose y significado de acrónimos utilizados en el trabajo

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA



8. Bibliografía

- [1] Imagen extraída de página consultada por última vez el 07/03/2020: <https://www.esmartcity.es/comunicaciones/comunicacion-proyecto-estacion-4-0-marca-futuro-metro-de-madrid-transformacion-digital-estaciones>
- [2] Manuel Melis Maynar, Francisco Javier González Fernández, “Ferrocarriles metropolitanos. Tranvías, metros ligeros y metros convencionales”, 2ª Edición Colección Seínor, Madrid, 2004. Pág. 243.
- [3] Francisco Javier González Fernández, “Señalización Ferroviaria. Del guardagujas a la operación sin conductor”, Madrid, 2009. Pág. 305.
- [4] Jahanzeb Farooq and José Soler, “Radio communication for Communications-Based Train Control (CBTC): A tutorial and survey”, DOI 10.1109/COMST.2017.2661384, IEEE Communications Surveys & Tutorials. Pág. 3.
- [5] Página consultada por última vez el día 23/03/2020: <https://www.hubersuhner.com/en/company/media/connected-stories/higher-capacity-and-safety-with-cbtc-system>
- [6] Imagen extraída de página consultada por última vez el 23/03/2020: <https://www.coit.es/sites/default/files/ppt-coit-metro-madrid.pdf>
- [7] Página consultada el 28/03/2020: <https://es.wikipedia.org/wiki/Metrocall>
- [8] Imagen extraída el día 23/03/ 2020 de noticia publicada en el siguiente medio: <https://www.movilzona.es/2015/08/21/el-metro-de-madrid-se-pondra-a-la-cabeza-en-conectividad-a-nivel-internacional-con-la-implantacion-del-4g/>
- [9] Paul Unterhuber, Stephan Pfletschinger, Stephan Sand, Mohammad Soliman, Thomas Jost, Aitor Arriola, Iñaki Val, Cristina Cruces, Juan Moreno, Juan Pablo García-Nieto, Carlos Rodríguez, Marion Berbineau, Eneko Echeverría and Imanol Baz, “A Survey of Channel Measurements and Models for Current and Future Railway Communication Systems” Hindawi Publishing Corporation, Mobile Information Systems. Volume 2016, Article ID 7308604.
- [10] M. Lienard, S. Betrencourt and P. Degauque, “Theoretical and experimental approach of the propagation at 2.5 GHz and 10 GHz in straight and curved tunnels”, Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No.99CH36324);1999;4; ;10.1109/VETECF.1999.
- [11] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 28/03/2020: <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/248/pfc2086.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] Andrej Hrovat, Gorazd Kandus and Tomaz Javornik, “A Survey of Radio Propagation Modeling for Tunnels”, Journals & Magazines, IEEE Communications Surveys & T.
- [13] Imagen extraída del libro: Manuel de la Fuente, “Por dentro: Metro de Madrid”. Ed. Media Minds, S.L. 2008.

- [14] Donald G. Dudley, Martine Liénard, Samir F. Mahmoud and Pierre Degauque, "Wireless Propagation in Tunnels", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No. 2 pp. 11-26, April 2007.
- [15] Y. P. Zhang, "Novel model for propagation loss prediction in tunnels", IEEE Transactions on Vehicular Technology; 2003;52;5;10.1109/TVT. 2003.
- [16] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 28/03/2020: https://es.wikipedia.org/wiki/Antena#/media/Archivo:Diagrama_gen_rad.JPG
- [17] Imagen extraída de página consultada el día 29/03/2020: <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/726/1391>
- [18] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 04/04/2020: https://es.wikipedia.org/wiki/Red_inal%C3%A1mbrica
- [19] Jesús Sánchez Ramírez, José Vicente Díaz Martínez, "Las redes inalámbricas, más ventajas que desventajas". Enlace al documento consultado por última vez el 11/05/2020: <https://www.uv.mx/iiesca/files/2012/12/redes2008-2.pdf>
- [20] Página consultada por última vez el día 04/04/2020: https://es.wikipedia.org/wiki/Entrega_de_mejor_esfuerzo
- [21] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 04/04/2020: <https://revistafibra.info/wp-content/uploads/2015/06/evoluci%C3%B3n-de-1G-a-5G-1160x652.jpg>
- [22] Página consultada e imagen extraída del siguiente enlace el 09/04/2020: <http://isa.uniovi.es/domotica/Temas/T3/T3-GSM>
- [23] Página consultada por última vez el día 09/04/20: <http://isa.uniovi.es/domotica/Temas/T3/T3-GPRS.htm>
- [24] Imagen extraída de página consultada el día 09/04/2020: <https://es.slideshare.net/Garry54/gprspresppt>
- [25] M. Sauter, "From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband", Wiley, 2010.
- [26] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez-Romero, O. Sallent, "LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles", Fundación Vodafone España, 2010.
- [27] Imagen extraída de página consultada el día 09/04/2020: http://www.ipv6go.net/lte/arquitectura_red_lte.php
- [28] Imagen extraída de página consultada el día 09/04/2020: <http://propagacionpcm.blogspot.com/2018/05/24-en-medio-heterogeneo.html>
- [29] ITU, "Sentando las bases para la 5G: Oportunidades y desafíos", 2018.
- [30] N.Morris. L. Kibet y M. Stephen, "Towards Device Driven 5G: Radio Resource Allocation Perspective", Proceedings of Sustainable Research and Innovation Conference, JKUAT Main Campus, Kenya, 2018.
- [31] Página consultada por última vez el día 25/04/2020: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11

- [32] Imagen extraída de página consultada el 25/04/2020: https://www.acksys.fr/en/wp-content/uploads/2016/04/ACKSYS_tren_metro_ES.pdf
- [33] Jerome Henry, Cisco Press “CCNA Wireless (640-722 IUWNE) Quick Reference”. ISBN-10: 1-58714-308-9, ISBN-13: 978-1-58714-308-3.
- [34] Imagen extraída de página consultada el día 25/04/2020: https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier-sense_multiple_access_with_collision_avoidance
- [35] Página consultada por última vez el día 26/04/2020: https://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11#IEEE_802.11a
- [36] Datos de tabla consultados por última vez el 26/04/2020 en la página: <https://norfipc.com/redes/tipos-redes-estandares-wi-fi-diferencias.php>
- [37] Página consultada por última vez el día 12/05/2020: <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/transmision-beamforming-la-clave-esta-en-los-detalles/>
- [38] Página consultada por última vez el día 12/05/2020: <https://www.linksys.com/es/r/resource-center/qu%C3%A9-es-mu-mimo/>
- [39] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 27/04/2020: <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2013/03/80211ac-channel-planning.html>
- [40] Aurora Moya, “Metro de Madrid: 1919-2009. Noventa años de historia”. Metro de Madrid, S.A.
- [41] Archivo Metro. Imagen extraída del libro Aurora Moya, “Metro de Madrid: 1919-2009. Noventa años de historia”. Metro de Madrid, S.A.
- [42] Página consultada por última vez el día 01/05/2020: https://es.wikipedia.org/wiki/Metro_de_Madrid
- [43] Página consultada por última vez el día 01/05/2020: <https://www.metromadrid.es/es/quienes-somos/somos-centenarios>
- [44] Página consultada por última vez el día 01/05/2020: [https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_8_\(Metro_de_Madrid\)](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_8_(Metro_de_Madrid))
- [45] Plano obtenido de página interna y corporativa de Metro de Madrid, consultada por última vez el 01/05/2020: <http://geometro.metromadrid.net:8080/GeoMetro/visor.jsp#>
- [46] Imagen extraída del libro: Manuel González Márquez, José Luis García Salazar, Manuel Melis Maynar y Fco. Javier González Fernández, “El Material Móvil del Metro de Madrid”. Metro de Madrid, S.A.
- [47] Plano: 22 500 “Parque de Material Móvil”. Área de Ingeniería, Servicio de Ingeniería de Material Móvil. Fecha de actualización: 1 de enero de 2019.
- [48] Extracto de página consultada el 02/05/2020: https://www.dip-badajoz.es/agenda/tablon/jornadaWIFI/doc/tecnologias_wifi_wmax.pdf
- [49] Imagen extraída de página consultada el día 02/05/2020: <https://avancedigital.gob.es/inspeccion-telecomunicaciones/Documents/InterferenciasCausadasRedesAreaLocal.pdf>

[50] Tabla confeccionada a partir de datos consultados por última vez el día 02/05/2020 en la página: <https://www.metageek.com/training/resources/wifi-signal-strength-basics.html>

[51] Todos los elementos propuestos se han consultado y obtenido del siguiente enlace, visitado por última vez el 8/05/2020: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/visio-stencil-listing.html>

[52] Normativa consultada por última vez el día 08/05/2020 en página: <https://standards.globalspec.com/std/13302578/EN%2050121-5>

[53] Ilustración extraída de página consultada por última vez el día 08/05/2020: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/industrial-wireless-3700-series/datasheet-c78-734968.pdf>

[54] Datos e ilustraciones de página consultada por última vez el día 15/05/2020: https://www.cisco.com/c/dam/en/us/td/docs/wireless/outdoor_industrial/iw3702/hardware/install/guide/b_iw3702_gsg.html

[55] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 08/05/2020: https://www.researchgate.net/figure/Differences-between-SU-MIMO-and-MU-MIMO_fig1_317889335

[56] Información extraída de página consultada por última vez el día 08/05/2020: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/antenna/installation/guide/ant2547vn.pdf>

[57] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 08/05/2020: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/8-1/Enterprise-Mobility-8-1-Design-Guide/Enterprise_Mobility_8-1_Deployment_Guide/cuwn.html

[58] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 08/05/2020: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/5500-series-wireless-controllers/data_sheet_c78-521631.pdf

[59] Imagen extraída de página consultada por última vez el día 09/05/2020: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/industrial-ethernet-4000-series-switches/datasheet-c78-733058.pdf>

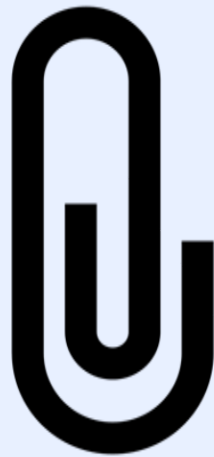
[60] Página consultada por última vez el día 09/05/2020: <https://www.napit.com.br/es/ekahau-site-survey-6-nuevas-caracteristicas-diferenciadas-para-la-integracion-wireless/>

[61] Página consultada por última vez el día 09/05/2020: <http://ferropedia.es/mediawiki/index.php/G%C3%A1libo>

[62] Página consultada por última vez el día 20/05/2020: <https://ciscoqpl.com/>

CAPÍTULO 9

ANEXOS



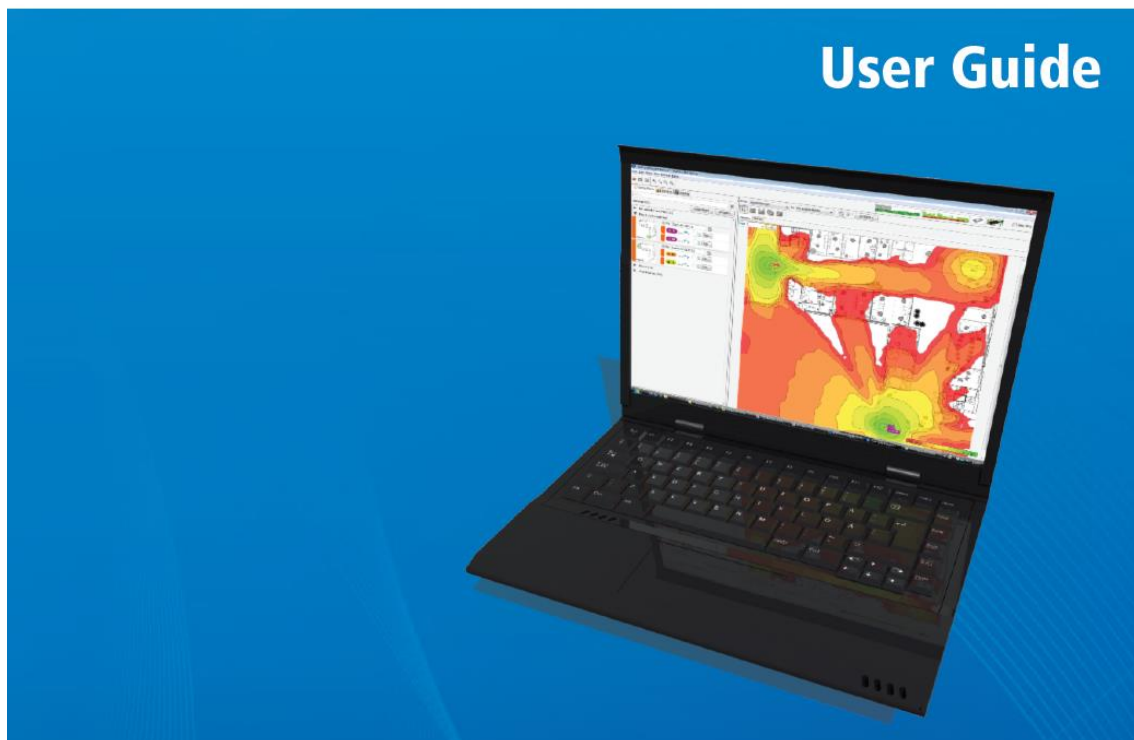
9. Anexos

Existe un manual de usuario disponible para familiarizarse con la herramienta de diseño *Ekahau*, que, debido a su extensión, se opta por proporcionar el enlace:

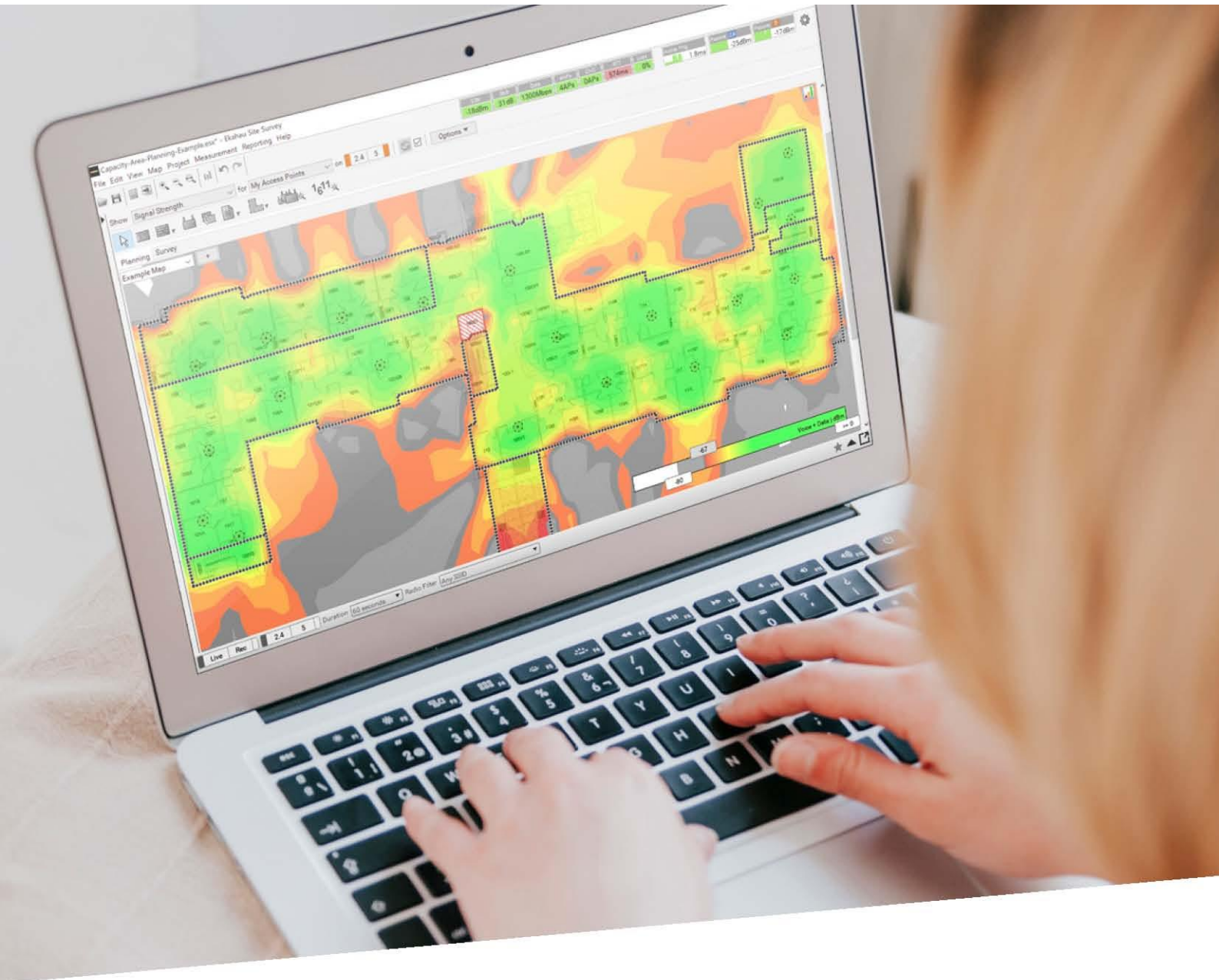
<https://avanis.de/importmedia/A5160/PDF/ESS%20User%20Guide.pdf>

Ekahau Site Survey

Wi-Fi Planning, Verification, Troubleshooting



Adicionalmente, en las siguientes páginas se ha incorporado una guía rápida para comprender los distintos módulos que conforman la herramienta de diseño de redes inalámbricas WiFi *Ekahau*.



A Beginner's Guide to Wireless Tools



To say Wi-Fi is a complex topic is an understatement. On the surface Wi-Fi seems simple enough, but as you go deeper, it soon becomes overwhelming. Even wireless professionals that work with Wi-Fi on a daily basis can find it challenging — especially without the right Wi-Fi tools!

Whether you're new to Wi-Fi or want a quick refresher, we'll cover the main tools needed to design, deploy, and maintain better Wi-Fi. This guide breaks down common types of tools used by wireless professionals today:

- Wireless network scanners
- Wireless network planning tools
- Wireless site survey tools
- Wireless spectrum analyzers
- Wireless Packet Capture Tool

Wireless Network Scanners

What they are used for:

To quickly gather and display various network parameters about nearby wireless networks.

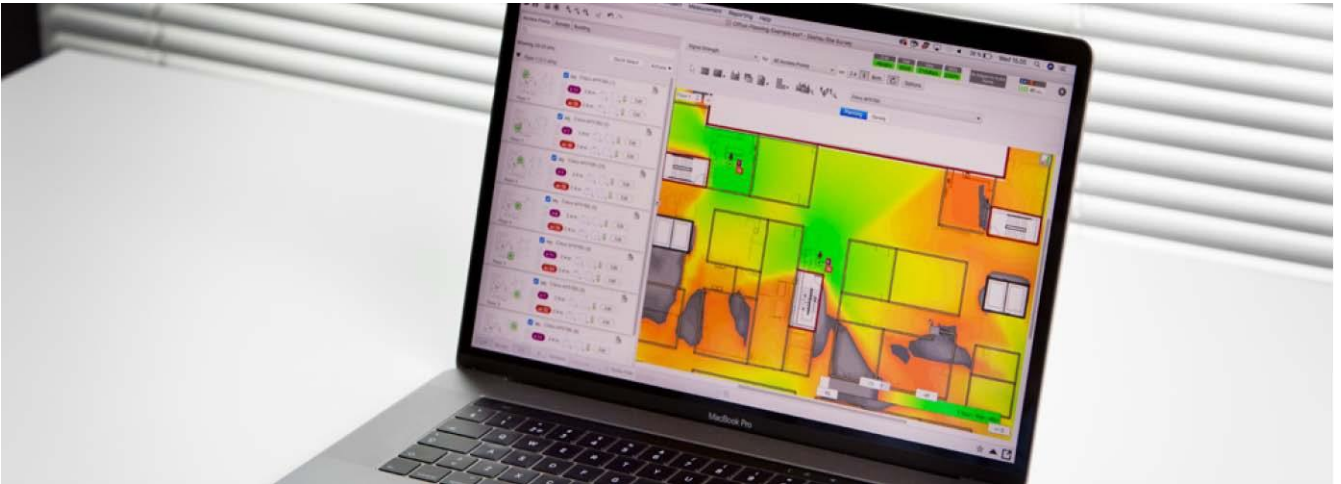
This information can be used to identify configuration issues, and also provide a graphical visualization of channel allocation to resolve channel conflicts.

How they work:

Most scanners leverage the built-in wireless radio of the device to perform a passive scan. By listening for beacon frames being transmitted from nearby wireless access points, the information contained within the beacon frames are decoded and displayed in a table. Channel information is commonly displayed using a graphical visualization.

Things to consider:

- The scan results are limited to the capabilities of the built-in Wi-Fi radio of the device being used to perform the scan. Be sure the device you are using supports the channel and bands you are looking to analyse.
- Wi-Fi scanner results are limited to a single location. To map out an entire Wi-Fi network requires using a Wi-Fi site survey tool.



Wireless Network Planning Tools

What they are used for:

To design a wireless network and determine the number of access points needed as well as the optimal location where each wireless access point should be installed.

How they work:

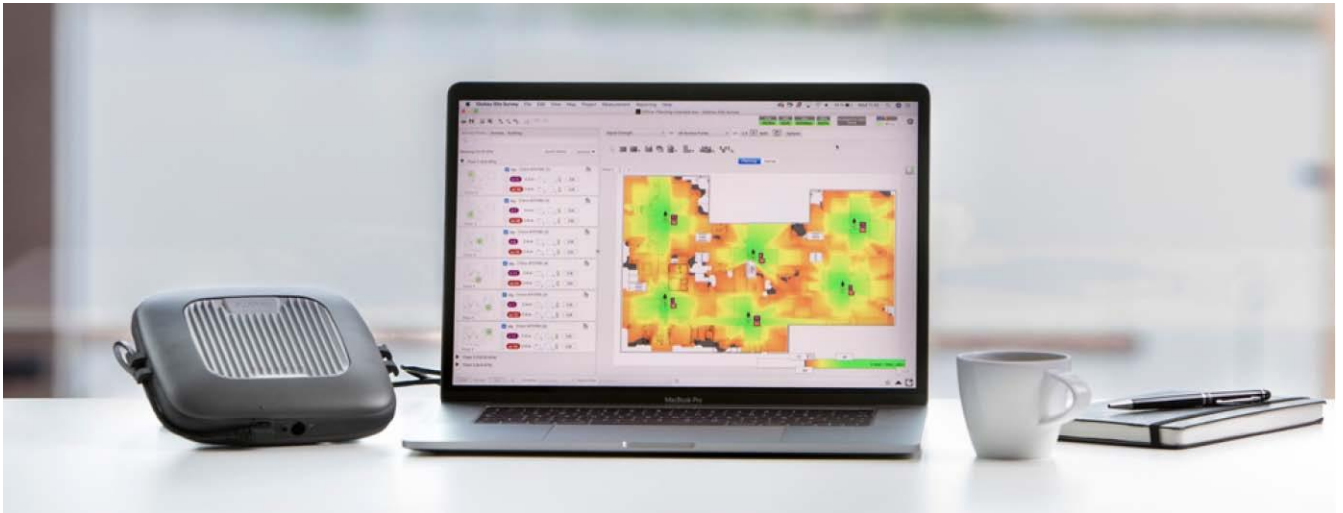
There are several methods that can be used to design a wireless network. The most common method is a predictive design. Start by importing a floor plan and modelling the physical environment (walls, doors, elevator shafts, etc). Simulate access point locations and visualize the RF signal propagation to ensure coverage and capacity requirements are satisfied.

Another common design method is referred to as the AP on a Stick (APoS) method. It entails attaching an access point to the top of a pole or tripod. By temporarily placing the access point at pre-planned locations throughout the site, it enables mapping out the coverage area of each access point location until all requirements are met.

Things to consider:

- **3D Planning** – Wi-Fi signals propagate in all directions. So, having a true 3D planner is important to factor in signal propagation to floors above and below, as well as various heights of objects located throughout the environment.
- **Automation features** – The planning process is often skipped or not performed properly due to time constraints. Planning software with automation capabilities can save a lot of time by automating a significant amount of the tedious work.
 - CAD files – AutoCAD (DWG) files can save a lot of time by automatically drawing the walls and objects as you import the floor plan
 - AP Auto-Planner – An AP auto-planner feature can save a lot of time by quickly planning out a network in 3D
 - Channel Auto-Planner – Determine what the optimal channel plan is going to be with the 'click of a button'
- **Capacity planning** – The number of Wi-Fi devices is ever increasing and putting more emphasis on the need for advanced capacity planning and analysis.
- **Up to date** – Wi-Fi technology is evolving at a rapid pace. Pick a planning tool that

keeps up with the latest advancements and includes the most recent Wi-Fi access points and antennas.



Wireless Site Survey Tools

What they are used for:

Wireless survey tools are used to validate new wireless deployments. They are also used to help optimize and troubleshoot existing wireless networks by creating a heat map of the wireless network coverage, throughput, interference, channel overlap, etc.

How they work:

A wireless site survey is conducted using a survey application, running on a laptop or tablet as well as a wireless measurement device, to continuously scan and collect metrics about the RF environment.

There are different types of surveys that can be performed to measure and validate various aspects of a wireless network and how it is performing.

- **Passive surveys** use one or more wireless radios to continuously scan wireless channels. By listening for beacons being transmitted from nearby wireless access points, the information received is then recorded onto a map and a heatmap is generated to visualize the data.
- **Active surveys** use a wireless radio (typically the built-in Wi-Fi adapter) to connect to the wireless network and validate that the network works. It also measures how it is performing by continuously conducting a ping or throughput test. The results will reveal how the network is performing by generating a heat map that visualizes network round-trip time, jitter, packet loss, and throughput.

Before a survey can be performed, accurate floor plans need to be obtained, imported into the survey application and calibrated to set the scale. Connect the measurement device and physically walk the site while clicking on the map to record the location of where the metrics were collected by the survey device.

After you've finished collecting...

Things to consider:

- An ultra-lightweight device with good battery life for surveying. Your back and arms

will appreciate it.

- Multiple radios to speed up scan times, as well as enable simultaneous passive and active surveying.
- A purpose-built Wi-Fi measurement device, rather than an off-the-shelf USB wireless adapter, which is not factory tuned and will provide inconsistent results.

Wireless Spectrum Analysers

What they are used for:

Spectrum analyser are used to help discover, locate, and mitigate non-802.11 interference, such as microwave ovens or cordless phones. Spectrum analysers can also be used to validate the health of the RF spectrum by measuring whether the wireless channels are busy/free.

How they work:

Spectrum analyser provide visual detection and analysis of electromagnetic signals over a defined band of frequencies. To perform spectrum analysis, a spectrum analyser is connected to a laptop or tablet and spectrum analysis software is used to visualize the measured electromagnetic signals.

It is possible to also use a spectrum analyser in conjunction with some site survey applications to gather and view spectrum data while performing a site survey.

Things to consider:

- **Site Survey software with spectrum analyser integration** - while performing a site survey, spectrum analysis is performed simultaneously with active and passive surveys.
- **Sweep time and resolution bandwidth (RBW)** – a spectrum analyser with faster sweep times means the visualizations will refresh more frequently making it easier to locate interference. Also, higher resolution means greater accuracy and helps with identifying the type of interference source.

Wireless Packet Capture Tool

What it is used for:

A wireless packet capture tool (also known as a packet sniffer) is a program that is used to intercept frames that are being transmitted by nearby access points or stations. The information logged can be analysed to troubleshoot difficult wireless network issues and further optimize and tune wireless networks.

How it works:

A wireless adapter that is capable of being put into monitor mode is required. Monitor mode allows an adapter to receive all the wireless traffic on a given channel. The capture tool can configure the adapter to listen on a single channel or to continuously scan through channels. The sniffer captures each frame and logs the captured frames into a file (PCAP) that can be saved and analysed using a packet analyser.

Things to consider:

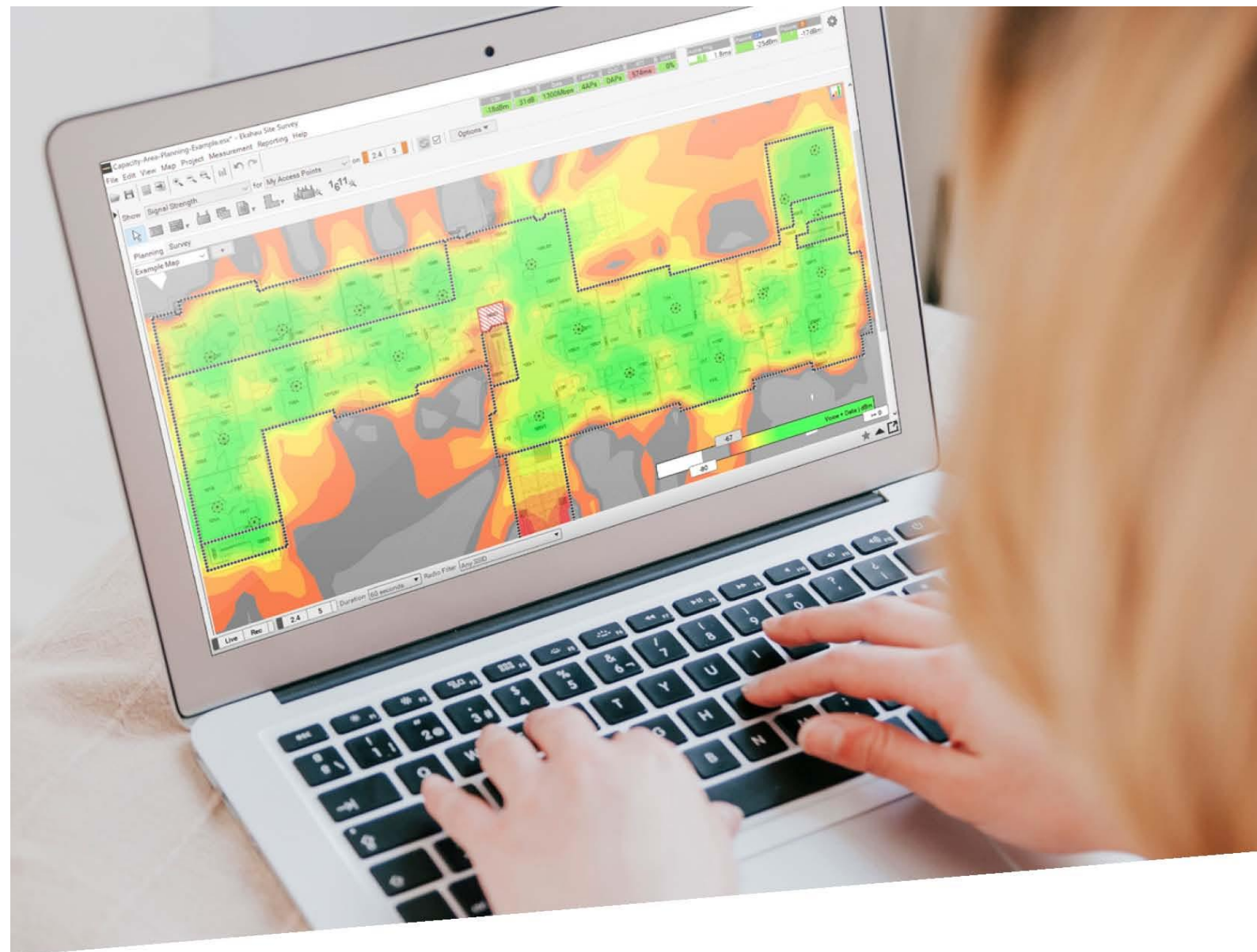
- A wireless adapter is restricted to listening on a single channel at any given time. Having more than one adapter can be beneficial, especially for troubleshooting roaming issues.
- Most off-the-self wireless adapters do not support monitor mode.



Get started

Learn more about Ekahau products and solutions related to designing, deploying and maintaining Wi-Fi networks.

- [Ekahau Site Survey](#) – Wi-Fi planning, site survey and WLAN troubleshooting solution
- [Ekahau Sidekick™](#) – All-in-One Wi-Fi Site Diagnostics and Measurement Device
- [Ekahau Spectrum Analyzer](#) – Discover, locate and eliminate Wi-Fi interference



Find out more

www.ekahau.com

ekahau
WIRELESS DESIGN