

Evaluación y diseño de un sistema de red para dar servicios de banda ancha en entornos rurales





Alba García Trujillo

M1.620 TFM – Sistemas de
Telecomunicación

Tutor/a de TF

Rubén Molina Casasnovas

Profesor/a responsable de la asignatura

Carlos Monzo Sánchez

Junio 2023

Universitat Oberta
de Catalunya



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/)

Copyright © 2023 ALBA GARCÍA TRUJILLO

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

C) Copyright

© ALBA GARCÍA TRUJILLO

Reservados todos los derechos. Está prohibido la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la impresión, la reprografía, el microfilme, el tratamiento informático o cualquier otro sistema, así como la distribución de ejemplares mediante alquiler y préstamo, sin la autorización escrita del autor o de los límites que autorice la Ley de Propiedad Intelectual.

Ficha del Trabajo Final

Título del trabajo:	Evaluación y diseño de un sistema de red para dar servicios de banda ancha en entornos rurales
Nombre del autor/a:	Alba García Trujillo
Nombre del Tutor/a de TF:	Rubén Molina Casasnovas
Nombre del/de la PRA:	Carlos Monzo Sánchez
Fecha de entrega:	Junio 2023
Titulación o programa:	Máster de Ingeniería de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Sistemas de comunicación
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave	Banda ancha, Entorno Rural, España Vacía, WiMAX
Resumen del Trabajo	
<p>En la actualidad, muchos de los entornos rurales no disponen de servicios de banda ancha o su capacidad es insuficiente para poder teletrabajar, cursar formaciones online, etc.</p> <p>Una de las causas principales de esta situación se debe a las características geográficas que estas zonas presentan (escasa población dispersa en grandes áreas geográficas y en orografías complicadas).</p> <p>Tras la crisis sanitaria por la pandemia de COVID-19, estos servicios de banda ancha se han convertido en un bien de primera necesidad y una fuente de oportunidades, además permite combatir el abandono, emigración y envejecimiento de poblaciones que azota a la “España rural” o “España vaciada”.</p> <p>La finalidad del presente trabajo es estudiar diferentes alternativas tecnológicas que ofrezcan dar servicios de banda ancha en estas zonas y seleccionar la más adecuada.</p> <p>La tecnología que se utilizará será WiMAX por aportar soluciones más beneficiosas, además se llevará a cabo su diseño para que sirva de implementación y ayude a reducir la brecha digital, luchar en contra de la despoblación y conseguir una mayor cohesión territorial y social de estos entornos rurales.</p>	
Abstract	
Currently, many rural environments do not have broadband services or their capacity is	

insufficient for teleworking, online learning, etc.....

One of the main causes of this situation is due to the geographic characteristics of these areas (low population spread over a large geographical areas and difficult orography).

After the health crisis caused by the COVID-19 pandemic, these broadband services have become a basic necessity and a source of opportunities, in addition to combating the abandonment, emigration and aging of populations that afflict "rural Spain" or "empty Spain".

The purpose of this work is to study different technological alternatives that offer broadband services in these areas and to select the most appropriate one.

The technology to be used will be WiMAX because it will provide more beneficial solutions, and its design will be carried out so that it can be implemented and help to reduce the digital gap, fight against depopulation and achieve greater territorial and social cohesion in these rural environments.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Contexto y justificación del Trabajo	1
1.2. Objetivos del Trabajo.....	5
1.3. Impacto en sostenibilidad, de diversidad y ético-social	6
1.4. Enfoque y método seguido	10
1.5. Planificación del trabajo	10
1.6. Breve resumen de productos obtenidos.....	13
1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria	13
2. Estado del Arte.....	14
2.1. Tecnologías de acceso a banda ancha.....	14
2.1.1. Acceso cableado.....	15
2.1.2. Acceso inalámbrico	17
2.2. Proyectos similares.....	26
3. Diseño del sistema	27
3.1. Características del entorno	27
3.2. Tipo de uso.....	28
3.3. Coste.....	28
3.4. Solución propuesta.....	29
3.4.1. Elección de la tecnología.....	29
3.4.2. Análisis de la tecnología elegida: WiMAX.....	31
4. Simulación diseño del sistema.....	46
4.1. Descripción del escenario.....	46
4.2. Topología de la red.....	50
4.3. Elección frecuencia de transmisión.....	53
4.4. Elección equipos.....	54
4.4.1. Estación Base (BS)	54
4.4.2. Terminal de usuario (CPE) o estación suscriptor.....	58
4.5. Simulación de la cobertura	59
4.6. Presupuesto	73
5. Conclusiones.....	75

6. Trabajos futuros.....	76
7. Glosario.....	78
8. Bibliografía.....	79
9. Anexos.....	83

Lista de Figuras

Figura 1: Clasificación del Índice de Economía y Sociedad Digitales (DESI) 2022.[1].....	2
Figura 2: Comparativa cobertura rural y total (España) por tecnología para redes de acceso desde una ubicación fija [3].....	3
Figura 3: Comparativa cobertura rural y total (España) por tecnología para redes de acceso móvil [3].	3
Figura 4: Comparativa cobertura rural y total en España por velocidades [3].	3
Figura 5: Ratio de masculinidad por tamaño de municipio, 2018-2020 (elaboración propia a partir de los datos del INE) [8].	8
Figura 6: Diagrama de Gantt de planificación del proyecto [9].....	12
Figura 7: Estructura de las redes de banda ancha para acceso a Internet.	14
Figura 8: Arquitectura xDSL [10].	15
Figura 9: Arquitectura HFC [10].....	16
Figura 10: Arquitectura FTTH.....	16
Figura 11: Proceso de radiación.....	17
Figura 12: Clasificación redes inalámbricas según el alcance.....	18
Figura 13: Ecosistema satelital [15].....	22
Figura 14: Evolución redes celulares.....	24
Figura 15: Evolución del estándar IEEE802.16 a lo largo del tiempo [21,22].	32
Figura 16: Arquitectura WiMAX [10].	33
Figura 17: BS con cuatro sectores [10].....	34
Figura 18: Componentes Estación Base (BS) [10].....	35
Figura 19: Equipamiento del usuario o CPE (exterior/interior) [10].	35
Figura 20: Ámbito de aplicación IEEE 802.16 [23].....	37
Figura 21: Características principales y parámetros del estándar WiMAX fijo [24].....	39
Figura 22: Señal inalámbrica sin OFDM y con OFDM [25].	40
Figura 23: Descripción de frecuencias OFDM [23].	40
Figura 24: Subtrama TDD [10].....	41
Figura 25: ULs y DLs entre BS y SSs [10].....	41
Figura 26: Funcionamiento seguridad WiMAX [24].....	45
Figura 27: Localización municipio.....	46
Figura 28: Pirámide de población Castañar de Ibor (2022). [29].....	47
Figura 29: Fotografías Castañar de Ibor.....	48
Figura 30: Edificación por década de construcción [30].....	48
Figura 31: Zonas para llevar a cabo el diseño.	49
Figura 32: Área de despliegue de la red en sombreado rojo.	50
Figura 33: Diagrama de red.....	52
Figura 34: Diagrama de red en Google Earth.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 36: Estación Base Albentia, modelo AXS-BS-453-N.	55
Figura 37: Diagrama de radiación de cuatro antenas de 60°.	55
Figura 38: Antena sectorial Albentia, modelo ACC-A60S.	56

Figura 39: Torre y contenedor de comunicaciones.....	56
Figura 40: Switch Netgear, modelo GS110TP.....	57
Figura 41: Firewall D-Link, modelo DBG-2000.....	57
Figura 42: Servidor Dell, modelo PowerEdge R250.....	57
Figura 43: Router Mikrotik, modelo RB2011UiAS-IN.....	58
Figura 44: Terminal de usuario Alentia, modelo AXS-CPE250-15.....	58
Figura 45: PoE tp-link, modelo TL-POE2412G.....	59
Figura 46: Router Wi-Fi tp-link, modelo Archer C80.....	59
Figura 47: Representación municipio en Radio Mobile.....	60
Figura 48: Configuración emplazamientos.....	61
Figura 49: Parámetros red WiMAX.....	61
Figura 50: Topología red PtmPT Wimax.....	62
Figura 51: Parámetros sistema Estación Base.....	63
Figura 52: Parámetros sistema CPE.....	64
Figura 53: Asignación miembros red PtmPt WiMax.....	65
Figura 54: Cobertura de radio polar de red PtmPt WiMAX.....	66
Figura 55: Enlace Radio Estación Base - Banco.....	67
Figura 56: Enlace Radio Estación Base - Chiringuito.....	68
Figura 57: Enlace Radio Estación Base - Cooperativa.....	69
Figura 58: Enlace Radio Estación Base - Cueva.....	69
Figura 59: Enlace Radio Estación Base – Gasolinera.....	70
Figura 60: Enlace Radio Estación Base - Hotel Rural.....	71
Figura 61: Enlace Radio Estación Base - Reciclados.....	71
Figura 62: Enlace Radio Estación Base - Solaire.....	72
Figura 63: Enlace Radio Estación Base - Tanatorio.....	73

Lista de Tablas

Tabla 1: Evolución de los estándares Wi-Fi [11].	20
Tabla 2: Modos funcionamiento capa física (PHY) [23].	38
Tabla 3: Bandas y frecuencias disponibles en WiMAX [23].	39
Tabla 4: Detalle emplazamientos para la cobertura*.	51
Tabla 5: Niveles máximos para 5,4 GHz.	63
Tabla 6: Presupuesto requerido para 9 potenciales usuarios.	73
Tabla 7: Parámetros Estación base Alentia, modelo AXS-BS-453-N.	83
Tabla 8: Parámetros antena sectorial Alentia, modelo ACC-A60S.	83
Tabla 9: Parámetros Switch Negear, modelo GS110TP.	84
Tabla 10: Parámetros Firewall D-Link, modelo DBG-2000.	84
Tabla 11: Parámetros Router Mikrotik, modelo RB2011UiAS-IN.	84
Tabla 12: Parámetros AXS-CPE250-15.	85
Tabla 13: Parámetros TL-POE2412G.	85
Tabla 14: Parámetros Archer C80.	85

1. Introducció

En este primer capítulo de la memoria nos situaremos en el contexto y justificación del trabajo. Se fijarán los objetivos, su impacto en sostenibilidad, de diversidad y ético social, la planificación de éste para llevarlo a cabo, un breve resumen de los productos obtenidos y se finalizará con una breve descripción del resto de capítulos.

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

En las zonas rurales persiste la falta de infraestructura y medios para dar los servicios básicos, afectando así a la cohesión social y territorial. Además, con el surgimiento de la pandemia de COVID-19 este hecho se hizo más evidente. Principalmente, existen deficiencias en infraestructuras de transporte, en telecomunicaciones (especialmente en el acceso a Internet de banda ancha), en el suministro energético, en el abastecimiento y depuración de aguas, entre otros. Por ello, se requiere realizar cambios para mejorar la cohesión social y territorial, eliminar la brecha entre el ámbito urbano y el rural y promover planes de acción de transformación en las zonas más afectadas por la desigualdad.

Este trabajo se centra en cubrir las deficiencias en infraestructuras de telecomunicaciones y en concreto, en la falta de acceso a servicios de banda ancha fija en estas zonas rurales.

Los servicios de banda ancha son aquellos que permiten al usuario, utilizando un terminal específico como puede ser el ordenador, el teléfono o el televisor, disponer de una conexión de datos permanente y de capacidad de transmisión elevada. [1]

Los servicios de banda ancha permiten el acceso a internet y suelen comercializarse con otros servicios de telecomunicaciones, como el servicio telefónico fijo, el servicio telefónico móvil o los servicios de televisión.

El acceso a Internet ha cambiado nuestra vida y alterado radicalmente cómo el ser humano interactúa con los demás, más aún en una situación de crisis sanitaria como fue la pandemia por COVID-19, se ha convertido en un bien de primera necesidad y una fuente de oportunidades. Es decir, toma gran importancia ya que facilita a la población el acceso a la información, así como a un gran número de servicios, a la par que posibilita el comercio electrónico, la disponibilidad de telemedicina, la administración electrónica, la educación online, el impulso del desarrollo rural para conectar las industrias agrarias y las empresas con los otros mercados, el ocio, tales como el turismo, las actividades recreativas o el seguimiento deportivo, además del teletrabajo, pudiendo mejorar así aspectos como la conciliación laboral ya que 2 de cada 3 trabajadores

manifiesta tener problemas para compaginar su jornada laboral con su vida personal/familiar, contribuyendo con todo ello a fijar la población y ayudar al crecimiento económico.

El Gobierno español, en esta dirección, ha puesto en marcha una diversidad de medidas entre las que cabe destacar por su importancia, la aprobación de la Ley General de Telecomunicaciones (Ley 11/2022, de 28 de junio), cuyo principal objetivo es el fomento de la inversión en redes de muy alta capacidad. La aprobación de esta ley constituye una de las medidas incluidas en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de la economía española (PRTR), aprobado por la Comisión Europea el día 16 de junio de 2021, con el objetivo a corto plazo de apoyar la recuperación de la economía española tras la crisis sanitaria, impulsar a medio plazo un proceso de transformación estructural y lograr a largo plazo un desarrollo más sostenible desde el punto de vista económico financiero.

Igualmente, la aprobación de la Ley constituye una de las principales medidas del Plan España Digital 2025, presentado por el Gobierno el 24 de julio de 2020, y que tiene por objetivo, como ya se ha dicho, impulsar el proceso de transformación digital del país, de forma alineada con la estrategia digital de la Unión Europea

Cabe destacar que España (ES) es uno de los países de Europa más avanzados en cuanto a conectividad (ocupa el puesto 3), puesto que cuenta con el establecimiento de las grandes redes rápidas y ultrarrápidas como son la banda ancha fija y móvil, tal y como se cotejan los resultados en DESI - Índice de Economía y la Sociedad Digitales [2].

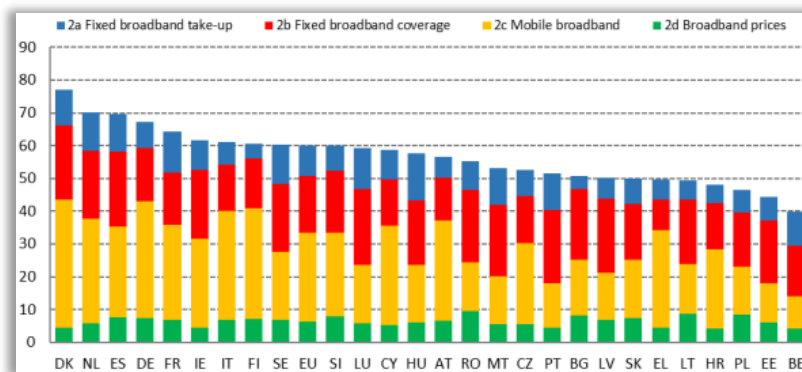


Figura 1: Clasificación del Índice de Economía y Sociedad Digitales (DESI) 2022.[1]

Sin embargo, la conectividad, que ha tomado una posición fundamental en muchos ámbitos (actividad económica, acceso a servicios, relaciones sociales y administrativas, entre otros), no está presente en todo el territorio, existe una carencia de infraestructura de comunicaciones en el medio rural en cuanto a calidad, capacidad y velocidad, con respecto al medio urbano.

Aunque este hecho se ha ido reduciendo en los últimos años, siguen existiendo importantes diferencias.

En las Figuras 2 y 3 se muestra la comparativa para distintas tecnologías entre la cobertura total nacional y la cobertura rural.

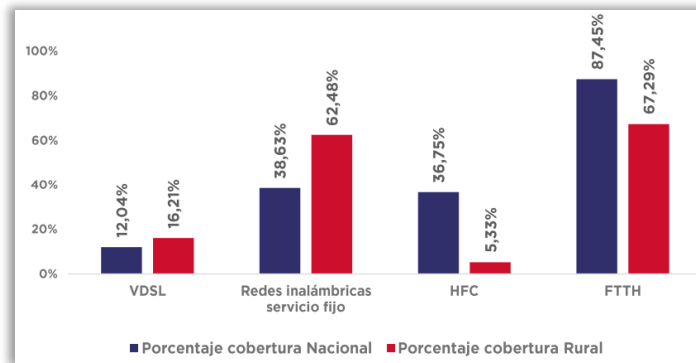


Figura 2: Comparativa cobertura rural y total (España) por tecnología para redes de acceso desde una ubicación fija [3].

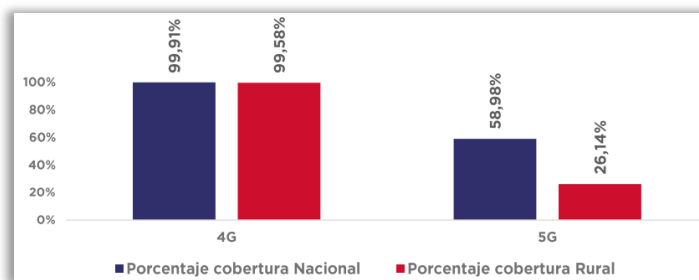


Figura 3: Comparativa cobertura rural y total (España) por tecnología para redes de acceso móvil [3].

En la Figura 4 se muestra la comparativa por velocidad entre la cobertura total nacional y la cobertura rural.

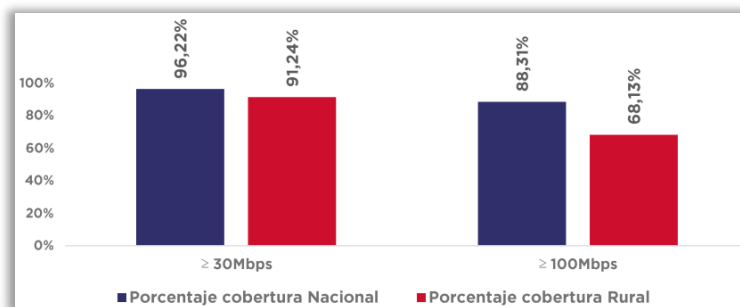


Figura 4: Comparativa cobertura rural y total en España por velocidades [3].

De las tres Figuras anteriores cuyos datos han sido obtenidos del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital sobre cobertura de banda ancha en España, correspondiente al informe de junio de 2021, se demuestra la brecha en los municipios rurales.

Según la tecnología, se aprecian mayores diferencias en redes cableadas como la Fibra Óptica (FTTH) y el Híbrido Fibra Coaxial (HFC).

Con respecto a las redes móviles, en 4G no se aprecian a penas diferencias, llegando ambas a una cobertura casi del 100%. Sin embargo, para la red 5G sí se aprecian mayores diferencias. Para este tipo de tecnología hay que tener en cuenta que las velocidades pico solo se obtienen cuando se dispone de un idóneo dimensionamiento de la red y que la velocidad de conexión, puesto que el ancho de banda se comparte entre usuarios, depende de los usuarios que estén conectados, del uso que éstos estén dando a la red, de la distancia a la que estén de la estación base así como de las interferencias que puedan darse, por lo que dichos resultados no representen la problemática que existe en las zonas más alejadas o localidades más despobladas.

Por otro lado, sobre la velocidad de conexión, se distingue mayores diferencias para las velocidades de 100 Mbps. Es decir, algo menos de dos tercios de las localidades rurales tiene acceso a Internet a velocidades superiores a 100Mbps, sin embargo, no llegan con la calidad necesaria.

Las principales causas de las diferencias anteriormente mencionadas se deben a que los municipios rurales están repartidos de forma dispersa, algunos están situados en orografías complicadas, tienen baja densidad poblacional y su nivel de ingreso per cápita es reducido. Por ello, hace que los operadores no encuentren un modelo viable para ofrecer comunicaciones en estas zonas por su difícil y lento aprovisionamiento.

La implantación de redes cableadas como el FTTH o el VDSL ofrecen una mayor flexibilidad y fiabilidad además de un gran ancho de banda, sin embargo, su instalación es costosa y lenta debido a las grandes distancias que hay que recorrer y los diferentes obstáculos orográficos que se encuentran, lo que dificulta que la población cuente con una conexión estable y de calidad (en algunos casos incluso es inexistente).

Una gran alternativa a este suceso son las redes que emplean el medio inalámbrico que permiten realizar despliegues más rápidos y con una mayor viabilidad de adaptación económica de la instalación, lo que lo hace ideal para municipios que se encuentran a distancias considerables y que cuentan con complejas estructuras del terreno como lo son los entornos rurales a pesar de que proporcionen un menor ancho de banda, seguridad y un medio físico menos estable que el medio cableado y el hecho de que hay que gestionar el espectro radioeléctrico.

En este contexto, con el fin de hacer frente a los retos demográficos, tecnológicos, sociales, médicos, así como mejorar la conectividad y en definitiva contar con una mejor infraestructura de telecomunicaciones para los entornos rurales se propone el diseño de un sistema de red inalámbrica para dar servicios de banda ancha fija de tal manera, que todos los habitantes puedan acceder a los servicios básicos en formato digital y no se queden atrás. El acceso y el

disfrute a todos los servicios digitales debe ser para todos igual sin importar el lugar en que éstos vivan.

Tecnologías inalámbricas como el servicio de distribución multipunto local - LMDS (Local Multipoint Distribution Service) o el Wi-Fi en conjunto con el satélite parecían los más convenientes, pero no constan como modelos generalizados de éxito para el ámbito rural. Por ello, en este entorno, surge la tecnología inalámbrica llamada WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) con el fin de poder aportar soluciones prometedoras al problema de las comunicaciones en entornos rurales, núcleos extensos, polígonos, municipios dispersos, extrarradios de poblaciones grandes y, en definitiva, lugares donde las tecnologías por cable (fibra óptica o VDSL) no llegan o no permiten un servicio de calidad.

WiMAX está estandarizada por el grupo IEEE 802.16 y su funcionamiento se basa en la emisión y recepción de ondas de radio en las frecuencias de 2,3 a 3,5 GHz (requieren licencia) y 5,2 a 5,8 GHz (no requieren licencia) a través de radioenlaces ubicados en los principales repetidores y lugares estratégicos de la geografía.

El primer motivo de su creación fue debido a la no disposición de técnica que permitiera la conexión a una red de una forma económica puesto que el acceso vía enlaces de radio con anchos de banda elevados supone un ahorro importante en el despliegue de infraestructuras, lo que hace que cuente también con un coste por servicio más bajo para los usuarios finales. Además, toma gran interés por permitir una cobertura y calidad de servicios mejores que otras redes similares como Wi-Fi lo que se puede llegar a concluir que es muy provechoso para lograr cobertura en zonas de área extensa, dispersas, etc. [4]

Por lo tanto, este trabajo plantea el diseño de una red basada en WiMAX para que sea desplegada por una operadora, empresa o administración pública, ofreciendo así sobre dicha red el servicio de banda ancha fija en hogares, empresas y administraciones públicas de ambientes rurales. De tal manera que se contribuya con la reducción de la brecha digital existente en el país y que además se satisfagan las demandas que se generen en dichas zonas. Así, el operador, la empresa o la administración pública puede invertir no solo en el desarrollo de la red descrita sino de la misma manera implementar en un futuro cercano la expansión de la red siguiendo el diseño planteado en este trabajo.

1.2. Objetivos del Trabajo

El presente trabajo se centra en aportar una solución en la que se pueda proporcionar servicios de banda ancha fija a residentes de entornos rurales que aún no disponen de dichos servicios o disponen de un servicio ineficiente. De esta manera, se proponen los siguientes objetivos:

- Realizar un estudio y análisis de las tecnologías de comunicación de banda ancha disponibles.
- Elegir la tecnología más eficiente a implementar y realizar un estudio.
- Realizar el levantamiento de la información necesaria para establecer las características con la que debe contar el sistema de red y demostrar sus beneficios.
- Diseñar y simular un sistema de comunicación para dar servicios de banda ancha a una población rural que permita determinar la factibilidad técnica y económica del uso de la tecnología elegida.

1.3. Impacto en sostenibilidad, de diversidad y ético-social

Ofrecer servicios de banda ancha en las comunidades rurales impacta positivamente en un gran número de aspectos. Aprovechar las capacidades de la conectividad ayuda a aportar un gran valor tanto a las personas como a afrontar grandes retos como el cambio climático, la desigualdad, la empleabilidad o la desinformación. Además, se tienen en cuenta para analizar el impacto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible como en [5].

A continuación, se detallan los impactos:

- **Impacto en sostenibilidad**

Es primordial actuar en un marco de eficiencia energética, de sensibilidad ambiental, y en general, de la sostenibilidad y la mejora de la gestión de los recursos. Este TF tiene mucho que aportar en este ámbito.

Por un lado, la gestión de la energía se ha convertido en un tema prioritario en la sociedad ya sea por el aumento del precio de la energía que está obligando tanto a optimizar su consumo o al desafío del cambio climático al que se enfrenta el mundo: reducir las emisiones de CO₂, haciendo un uso cada vez más eficiente de la energía al mismo tiempo que se incrementa el uso de renovables (energías fotovoltaica, geotermal, eólica, biomasa, etc.). Tener el hogar conectado gracias a sus algoritmos y muchas de sus funciones, es posible ahorrar una cantidad importante de energía al mes ya que permitirá por ejemplo encender o apagar luces automáticamente, o desconectar ciertos enchufes en determinados rangos horarios para que su consumo sea cero, o regular la temperatura evitando un gasto innecesario de aire acondicionado o calefacción. Ayudar a una gestión eficiente de la energía en la vivienda puede llegar a reducir entre el 8% y el 15% de las emisiones de efecto invernadero.

Otro aspecto positivo que aporta este TF es permitir realizar gestiones online (pago de tasas e impuestos, realizar trámites, telemedicina...) e incluso teletrabajar desde el hogar evitando la necesidad de desplazarse en vehículos por lo que se producirá una disminución de la contaminación. Este aspecto toma más peso en los entornos rurales debido a que muchas de las gestiones a realizar requieren desplazamientos de bastantes kilómetros. También se reducirá

la necesidad de papel, cuya fabricación tiene un impacto ambiental (tala de árboles, consumo energético, consumo de agua, vertidos contaminantes, residuos, etc.).

Por otro lado, se tiene en cuenta que los entornos rurales se encuentran en orografías complejas o en hábitat naturales (ej.: geoparques, reservas...) por lo que se hace indispensable generar el menor impacto medioambiental. Sin duda el uso una red inalámbrica permite minimizar este impacto debido a que su despliegue requiere de muy poca infraestructura (no es necesario tendidos aéreos ni realizar zanjas).

Por último, la sociedad, a pesar de estar ya más concienciada con el despliegue de nuevas tecnologías radio, sigue considerando que las ondas electromagnéticas que se generan son perjudiciales para la salud. Para este aspecto existen normativas específicas de los sistemas de radiocomunicación donde establecen las condiciones mínimas de seguridad sobre la salud de los sistemas radioeléctricos. Además, en respuesta a esta inquietud del público, la OMS ha establecido un proyecto internacional para evidenciar científicamente los efectos en la salud, donde se ha concluido lo siguiente:

“Teniendo en cuenta los muy bajos niveles de exposición y los resultados de investigaciones obtenidos hasta el momento, no hay ninguna prueba científica convincente de que las débiles señales de RF procedentes de las estaciones base y de las redes inalámbricas tengan efectos adversos en la salud”. [6]

En este sentido, las redes inalámbricas bajo diferentes características permiten minimizar también los efectos negativos para el ser humano y el medioambiente si se tienen en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El cumplimiento de las políticas globales, nacionales y autonómicas de medioambiente y gestión energética.
- La optimización del consumo de recursos, el fomento de la reutilización y el reciclaje para minimizar el impacto y favorecer la reincorporación de materiales al ciclo productivo.

▪ **Impacto en diversidad**

Es primordial también actuar en un marco de igualdad, independientemente del género, raza, creencias religiosas o situación económica, y en definitiva de diversidad.

Existen diferencias entre el medio rural y el medio urbano sobre la falta de infraestructura de telecomunicaciones, que sería la brecha digital primaria, puesto que el acceso es el requisito indispensable para su uso, pero también se dan otras diferencias sobre la capacidad de las personas y empresas del medio rural para acceder a las tecnologías digitales para efectuar su vida.

En la actualidad, las personas necesitan competencias digitales básicas para llevar a cabo su día a día, ya sea la hora de comunicarse, buscar información, realizar transacciones, comprar o reservar una cita médica y competencias digitales asociadas al desempeño del trabajo para el

manejo de herramientas ya que sin ella existe más riesgo de perder el empleo. Sin embargo, aquellos que viven en entornos rurales carecen de estas competencias lo que puede provocar situaciones de exclusión digital, así como la limitación de competencias asociadas al desempeño del trabajo porque sin conectividad o sin la existencia una conectividad adecuada que permita la accesibilidad a los recursos tecnológicos y el desarrollo de las competencias digitales convenientes, difícilmente se pueden llevar a cabo estas habilidades digitales.

Hay que considerar también que las principales características de la población del medio rural son el envejecimiento y la masculinización con respecto al medio urbano y que los niveles de renta de los hogares o el nivel de educación es otra característica que diferencia al medio rural del urbano, así como el género. Todo esto determina el menor uso de los servicios de banda ancha [7].

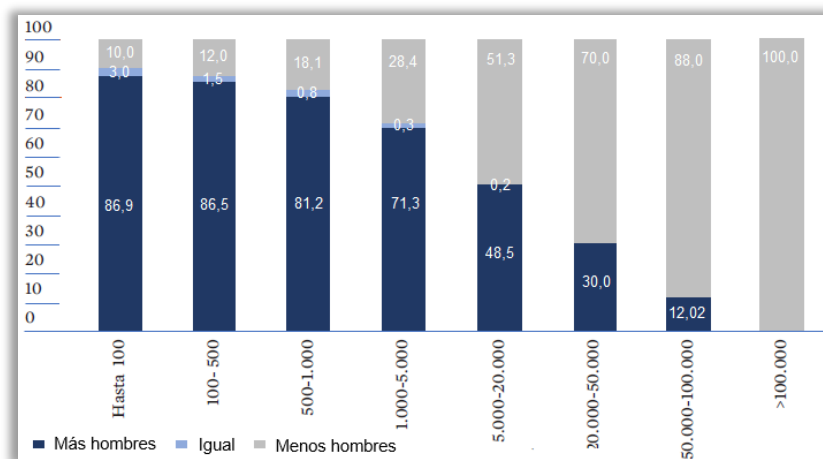


Figura 5: Ratio de masculinidad por tamaño de municipio, 2018-2020 (elaboración propia a partir de los datos del INE) [8].

Por tanto, este TF tiene mucho que aportar en este ámbito al acercar la conectividad y la digitalización a todas personas, sin dejar atrás a nadie, impulsando el desarrollo social y reduciendo la brecha digital por acceso, asequibilidad, formación en competencias digitales o por motivos de residencia en núcleos urbanos frente a zonas de ruralidad.

Ofrece la oportunidad de utilizar los servicios de banda ancha para contribuir al bienestar y la calidad de vida de los ciudadanos que viven en las zonas rurales y poblaciones dispersas, lo que redunda en mejoras como:

- Calidad de enseñanza y una mejor capacitación del estudiante para su integración posterior en la sociedad y el mercado laboral.
- Facilitación de integración social de personas mayores y de comunicación interactiva con servicios de asistencia social y sanitaria.
- Disminución de las tasas de desempleo.
- Incremento de la renta per cápita.

- Crecimiento del entorno económico, al desaparecer la ventaja competitiva de empresas urbanas con acceso a servicios digitales.
- Consolidar y potenciar las empresas ya existentes, al dotarlas de soluciones para su gestión diaria, para la creación de una red de comunicación de datos propia y para atraer nuevos clientes no ubicados en su área de influencia geográfica directa.
- Incremento de la productividad y la competitividad de las empresas por la introducción de las TIC en los procesos productivos y operativos.
- Cambio cultural en la organización del trabajo al permitir la colaboración en red. Flexibilización de las jornadas laborales de los empleados, gracias a la utilización de la tecnología (teletrabajo).
- Incremento de la población activa, al posibilitarse opciones como el teletrabajo.
- Nuevos servicios que las administraciones públicas podrán prestar al ciudadano, como administración electrónica, teleasistencia, teleformación, telemedicina o creación de coworking que fomente el turismo y con ello la economía del lugar.
- Facilitar la cohesión territorial.

- **Impacto ético-social**

Con la revolución de las tecnologías digitales se ha abierto un mundo lleno de posibilidades y también de riesgos. Por ello, es necesario tener un marco ético y normativo homogéneo para el despliegue de nuevas tecnologías.

En este ámbito, este TF aporta aspectos positivos como el incluir el derecho de acceso a la red donde se garantiza que las personas disponen de los recursos para poder efectuar su vida en los espacios digitales. La conectividad es una herramienta fundamental para facilitar y promover los derechos de las personas (ej.: a través del acceso a la información e intercambio de ideas).

También se promueven guías para un despliegue de la red responsable para el cuidado del medioambiente (se tiene en cuenta un control de riesgos e impactos ambientales en la gestión de la red en todo su ciclo de vida para así reducir el impacto ambiental y aumentar la capacidad a través de la adaptación al cambio climático).

Además, este trabajo demanda para el desarrollo económico en las áreas rurales una mayor responsabilidad social que garantice la inclusión, más protección de los ecosistemas y la biodiversidad y más riqueza compartida en beneficio de las generaciones presentes y futuras. A esto se le suma la sensibilización a impregnar el desarrollo y emprendimientos de las personas.

En conclusión, acercando la conectividad a la vida de las personas se pretende construir una solución que proteja el plantea y sea justa para todos.

1.4. Enfoque y método seguido

El enfoque de este trabajo tiene por objeto el promover el despliegue o explotación de una red de telecomunicaciones que permita ofrecer servicios de banda ancha adaptado a entornos rurales de tal manera que resuelva los problemas de conectividad que tienen en la actualidad, principalmente, que muchas de estas zonas no disponen de servicios de banda ancha asequibles (las actuales ofertas de acceso por satélite o por línea telefónica alquilada son considerados, en general, como demasiado caras para los usuarios) en aras de reducir la brecha digital, luchar en contra de la despoblación y conseguir una mayor cohesión territorial y social.

El método seguido ha sido el científico, adaptado de acuerdo con las circunstancias de este TFM, donde en primer lugar, se define el problema, después, se formula la hipótesis a raíz de lo observado en la definición del problema, luego, se lleva a cabo la experimentación de la hipótesis, más tarde, se disecciona todos los datos e información extraída de la experimentación con objeto de analizarla y finalmente, se publican las conclusiones a la que se ha llegado así como se plantean las líneas futuras de trabajo.

1.5. Planificación del trabajo

Para la elaboración del presente trabajo, en primer lugar, se ha determinado el tema a desarrollar, así como una definición del alcance inicial. A continuación, se ha elaborado una planificación de éste, dividiendo las tareas a realizar en las siguientes fases (con inicio el 1 de marzo del 2023 y fin el 9 de julio del 2023):

Fase 1. *Planteamiento y alcance: descripción y organización de trabajo*

Se establecen los principales puntos de inicio del trabajo: introducción, contexto y justificación del trabajo y objetivos, así como se identifican los posibles impactos en sostenibilidad, de diversidad y ético-social. Con esta información se realiza una planificación del resto de fases.

Las actividades de esta fase quedan reflejadas en el entregable PEC1.

Fase 2. *Estado del Arte: análisis e investigación*

Se realiza un análisis e investigación a través de documentación de referencia sobre diferentes tecnologías de banda ancha disponibles de tal manera que permitan determinar la tecnología más adecuada que satisfaga las necesidades del trabajo.

Las actividades de esta fase quedan reflejadas en el entregable PEC2.

Fase 3. *Diseño e implementación*

Se lleva a cabo el detalle técnico del sistema a diseñar teniendo en cuenta los requisitos requeridos.

Las actividades de esta fase quedan reflejadas en el entregable PEC3.

Fase 4. *Memoria*

Se especifica el detalle del trabajo realizado y se irá realizando en paralelo con el resto de las fases conforme se van obteniendo los diversos entregables.

Las actividades de esta fase quedan reflejadas en el entregable PEC4.

Fase 5. *Presentación y defensa*

Se elabora presentación explicando toda la información relevante del trabajo y posteriormente se llevará a cabo la defensa del trabajo donde se resolverán las cuestiones efectuadas por el tribunal asignado.

Las actividades de esta fase quedan reflejadas en el entregable PEC5.

En el siguiente diagrama de Gantt se especifican las diferentes fases, las dependencias entre ellas y la estimación de fechas:

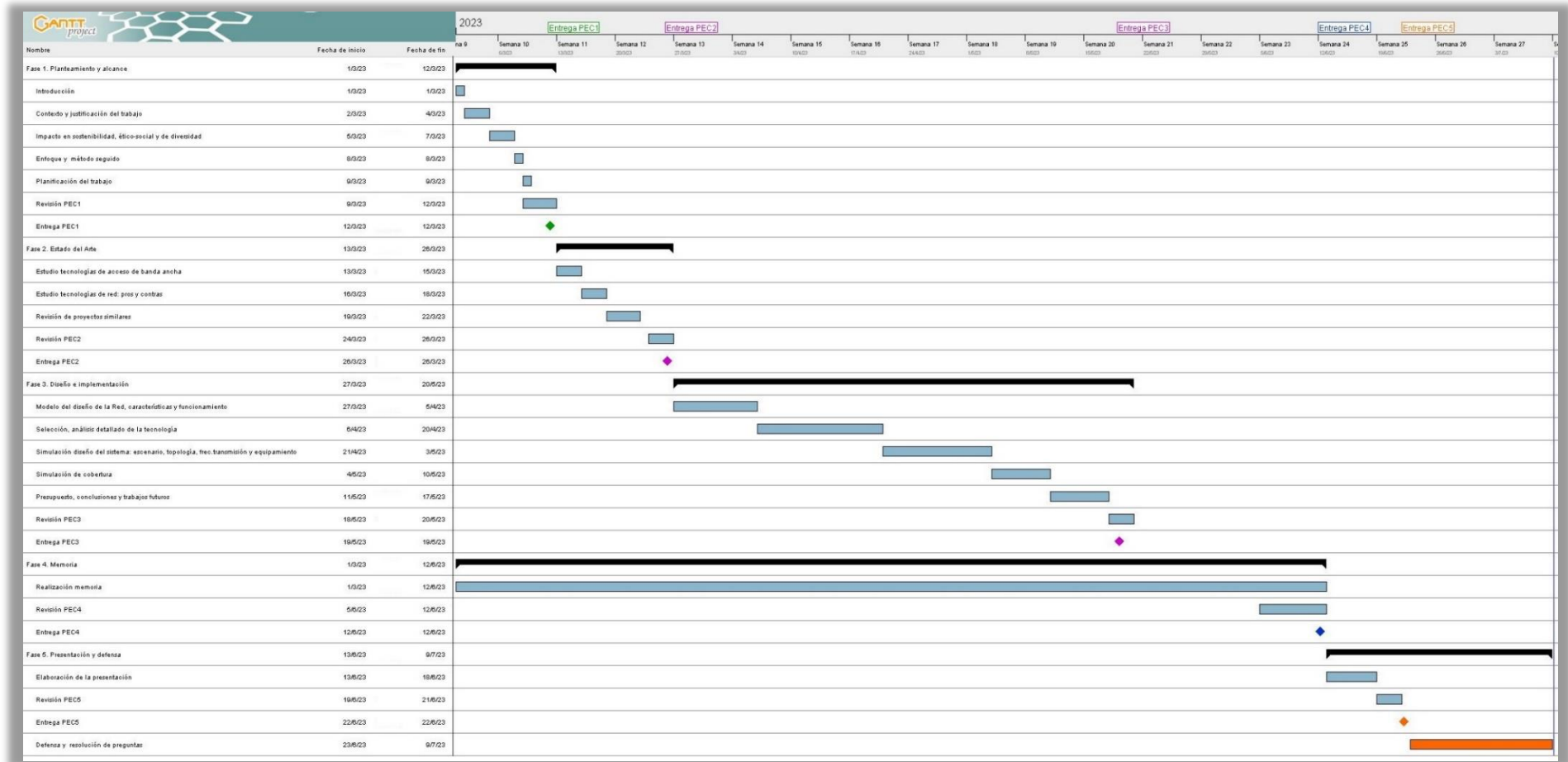


Figura 6: Diagrama de Gantt de planificación del proyecto [9].

1.6. Breve resumen de productos obtenidos

El objetivo de este trabajo no atiende a la obtención de ningún producto final, sino de realizar un estudio de viabilidad del despliegue de una infraestructura de banda ancha para conectarse a internet desde zonas dispersas y pequeños municipios de la “España rural” o “España vaciada” donde no llegan los accesos cableados o el servicio que se presta en dichas zonas es ineficiente.

Los componentes obtenidos son estudios técnicos donde se refleja los aspectos necesarios para el diseño e implementación de la red inalámbrica seleccionada: WiMAX.

1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

Después de este capítulo introductorio, en el capítulo 2 se presenta el estado del arte, donde se hará un repaso de las diferentes tecnologías de banda ancha implicadas en este TFM y trabajos similares.

En el capítulo 3, diseño del sistema, se englobarán los principales requisitos para tener en cuenta en el sistema, así como se realizará una comparativa de tecnologías red, donde se seleccionará la más adecuada para llevar a cabo una solución que permita prestar servicios de banda ancha en zonas rurales. En última instancia se detalla las bases teóricas y los elementos de la red con los que debe contar la solución propuesta.

En el capítulo 4 se detallará el supuesto práctico, en el que se pretende dotar de una red que de servicios de banda ancha con la tecnología seleccionada en el capítulo 3 en un municipio rural de la provincia de Cáceres, Extremadura.

El capítulo 5 recopilará las principales conclusiones a las que se llega con el presente estudio y caso práctico realizado.

En el capítulo 6 está dedicado a la exposición de los trabajos futuros.

En el capítulo 7 se incluye el glosario de los términos utilizados en la memoria.

En capítulo 8 está dedicado a las fuentes bibliográficas utilizadas en el trabajo.

Y, por último, en el capítulo 9 se añaden los anexos de los equipos utilizados para el desarrollo del TFM.

2. Estado del Arte

Este segundo capítulo de la memoria se estudiará cómo se encuentran las diferentes tecnologías de acceso a banda ancha implicadas en la realización de este trabajo, así como se expondrán algunos trabajos similares a este TFM.

2.1. Tecnologías de acceso a banda ancha

Los servicios de banda ancha son aquellos que permiten al usuario a través de un terminal específico, como un ordenador, móvil, tablet, televisión, etc., disponer de una conexión de datos permanente y de capacidad de transmisión elevada para acceder a Internet y a sus servicios relacionados como el servicio de voz, el servicio de video, etc.

La estructura actual de las redes de telecomunicaciones de banda ancha para el acceso a Internet y los servicios que ofrece, de manera general se observa en la Figura 7:

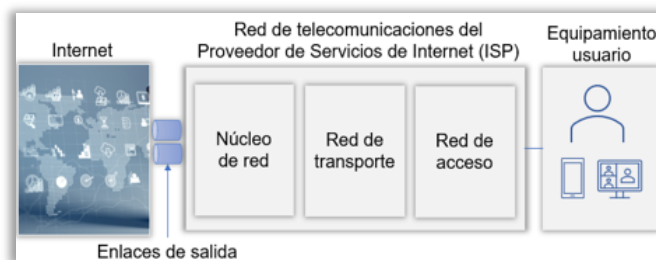


Figura 7: Estructura de las redes de banda ancha para acceso a Internet.

Los elementos con los que cuenta esta estructura son:

Enlaces de salida: internacionales (enlaces que unen países) o locales (para el intercambio de tráfico local conocidos como punto de acceso a la red).

Red de telecomunicaciones del Proveedor de Servicios de Internet (ISP). Se compone de:

- **Núcleo de red:** redes y equipos de conmutación, de paquetes de alta capacidad y velocidad, que permiten concentrar el tráfico de todos los usuarios de la red y encaminar los datos desde y hacia internet a través de los enlaces.
- **Red de transporte:** infraestructura, equipos, y medios de necesarios para transportar las señales de telecomunicaciones como la fibra óptica, microondas o enlaces satelitales. Tienen un largo alcance.
- **Red de acceso:** infraestructura, equipos y medios de acceso necesarios para conectar los terminales de los usuarios con la red. Tienen un corto alcance.

En la actualidad, las tecnologías que permiten ofrecer servicios de banda ancha pueden clasificarse en dos grandes grupos según el tipo de acceso: acceso cableado y acceso inalámbrico.

A continuación, se realiza un estudio detallado de cada acceso y sus tecnologías más relevantes para este trabajo:

2.1.1. Acceso cableado

Se trata de aquellos accesos que requieren una conexión por medio de un cable hasta el terminal del usuario, por lo que la ubicación del usuario es relativamente fija.

Estos accesos se pueden basar en las siguientes tecnologías:

- **xDSL (ADSL/VDSL):**

Estas redes se han ido desarrollando gradualmente en las últimas décadas, pero todas comparten el mismo principio de conectar los hogares de una determinada zona a una central a través de pares de cobre para proveer de banda ancha.

Tienen límites en cuanto a velocidad máxima y distancia de cobertura (ej.: VDSL2 permite una velocidad de descarga de 100Mbps en condiciones ideales).

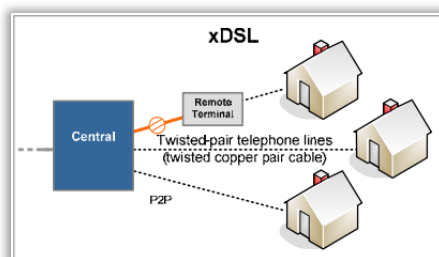


Figura 8: Arquitectura xDSL [10].

El principal obstáculo de esta tecnología es que la velocidad de transmisión disminuye al aumentar la distancia entre la central telefónica y el usuario. Además, el ancho de banda entregado al usuario depende de factores como la distancia, la calidad, el calibre del cable y el modelo de modulación utilizado.

- **Cable o HFC:** se conocen como redes híbridas de fibra óptica y cable coaxial.

Inicialmente, estas redes se diseñaron para soportar únicamente emisiones descendentes. En la actualidad, el tráfico ascendente también se soporta haciendo uso de módems de cable para un acceso completo a Internet.

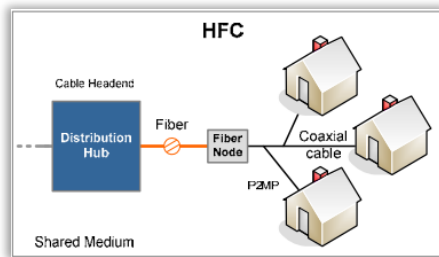


Figura 9: Arquitectura HFC [10].

Su ancho de banda es grande, aunque limitado. Para los usuarios finales permite 160 Mbps en sentido descendente y 120 Mbps en sentido ascendente (utilizando el estándar Docsis 3.0). Hay que tener en cuenta que HFC utiliza un medio compartido, por lo que el ancho de banda también se comparte por los usuarios.

▪ **Fibra óptica hasta el hogar (FTTH):**

Proporciona un acceso de fibra entre los equipos de transmisión ubicados en la central y el domicilio de cliente.

La Central cabecera FTTH es un edificio en donde se ubican los equipos de terminación de la red óptica que atienden a una determinada zona o área de influencia en el despliegue de fibra.

A partir de esta Central, se despliegan cables de fibra óptica de gran capacidad (árboles) a través de las rutas de canalizaciones subterráneas principales, que discurren normalmente por las rutas más importantes y son accesibles mediante cámaras de registro.

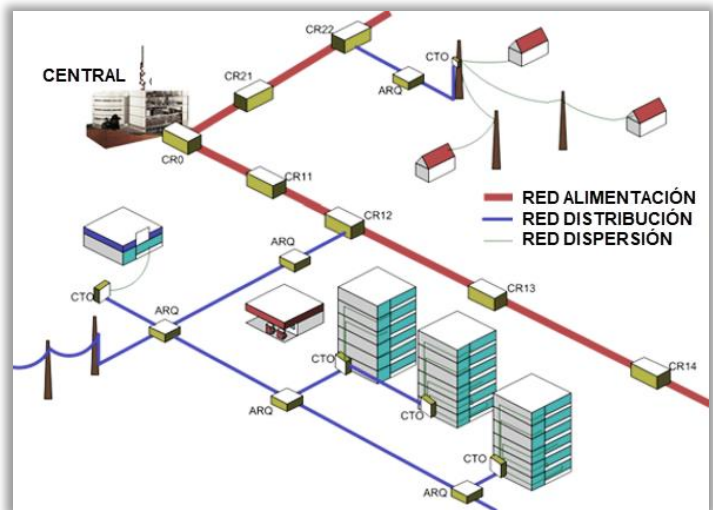


Figura 10: Arquitectura FTTH.

Estas rutas se irán ramificando (despeinándose en cables de menor capacidad) utilizando las canalizaciones secundarias. En aquellos casos en los que no existiesen estas canalizaciones, los cables pueden seguir recorridos por fachadas hasta alcanzar los domicilios de los potenciales usuarios. Excepcionalmente podrían utilizarse trazados aéreos.

La red FTTH es totalmente pasiva. En todo el recorrido de los cables entre la Central y el domicilio del cliente no es necesaria la instalación de repetidores u otros elementos intermedios que requieran de alimentación eléctrica. Ello aumenta la seguridad, así como la calidad de las comunicaciones y de los diferentes servicios.

Dependiendo del nivel de agrupación de la red, su capilaridad y grado de penetración, la red FTTH está dividida en tramos que se denominan respectivamente Alimentación, Distribución y Dispersión.

Ofrece un gran ancho de banda con altas velocidades de descarga pudiendo alcanzar velocidades teóricas de más de 1Gbps y una latencia aproximada a 30ms.

En general, las tres tecnologías proporcionan gran fiabilidad. Además, como es el caso del FTTH, ofrecen un gran ancho de banda capaces de soportar multitud de servicios. Sin embargo, su instalación es costosa y lenta.

2.1.2. Acceso inalámbrico

Donde la comunicación se realiza por medio de ondas radioeléctricas. Estas ondas electromagnéticas se propagan por el espacio sin guía artificial y tienen frecuencias comprendidas entre 30 KHz y unos 3000 GHz.

El enlace por ondas entre terminales permite eludir su conexión rígida por cable. Como consecuencia, la comunicación lleva implícita la ubicuidad y la movilidad de los terminales, pero requiere que el usuario esté a una distancia del punto de acceso no superior al alcance de este.

Para la radiocomunicación se superpone la señal de información a una onda soporte, portadora, mediante un proceso de modulación. La onda resultante (onda modulada) se envía al medio de propagación a través de un dispositivo de acoplamiento (sistema radiante).

Se denomina emisión al proceso de radiación de una onda modulada por un equipo transmisor.

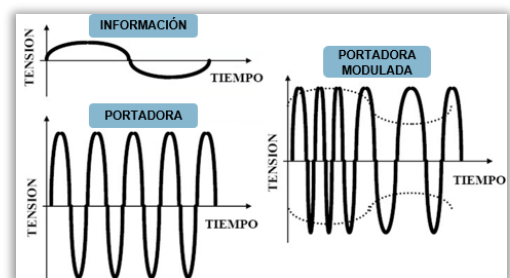


Figura 11: Proceso de radiación.

Los elementos físicos que soportan las radiocomunicaciones se denominan estaciones radioeléctricas y pueden clasificarse por:

- Función: transmisoras (TX), emisoras (RX) y mixtas (TRX).
- Movilidad: fijas, móviles.
- Ubicación: terrenales y espaciales.

A diferencia de tecnologías cableadas, son redes flexibles, escalables y permiten realizar despliegues rápidos y de mejor ajuste económico. Sin embargo, proveen de un medio físico menos estable que los accesos cableados ya que la transmisión se realiza por un medio no guiado (aire), así como que ofrecen menor ancho de banda que estos.

Las comunicaciones inalámbricas pueden clasificarse de maneras diferentes según el criterio al que se atienda.

Según el alcance se dividen en los siguientes grupos:

- **WBAN** (Wireless Body Area Network): cubren distancias de 1 o 2 metros.
- **WPAM** (Wireless Personal Area Network): cubren distancias inferiores a los 10 metros y están diseñadas para una velocidad de datos baja (normalmente 100-200 kbps). Ideadas para interconectar dispositivos de un usuario (ej.: el ordenador con la impresora). Son el caso del estándar es el IEE 802.15 (Bluetooth) o ZigBee.
- **WLAN** (Wireless Local Area Network): cubren distancias de unos 100 metros y están diseñadas para una alta velocidad de datos (normalmente de 1 a 20 Mbps). Ideadas para crear un entorno de red local entre ordenadores o terminales situados en un mismo edificio o conjunto de edificios. Una tecnología de esta familia es Wi-Fi.
- **WMAN** (Wireless Metropolitan Area Network): trabajan a unos 20 Km y pretenden cubrir el área de una ciudad o un entorno metropolitano. Son redes de alta capacidad que unen varias redes WLAN. Una tecnología de esta familia es WiMAX.
- **WWAN** (Wireless Wide Area Network): pueden cubrir toda una región (país o grupo de países). Se basan en tecnología celular.

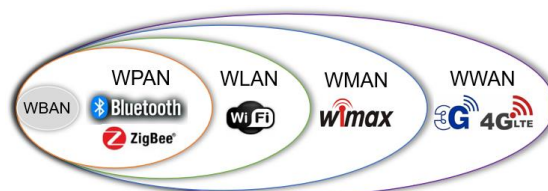


Figura 12: Clasificación redes inalámbricas según el alcance.

Según la línea de visión se clasifican en:

- **LOS** (line of sight): requieren línea de visión directa entre los puntos.
- **NLOS** (non line of sight): no requieren línea de visión directa entre los puntos.

Según la topología de la arquitectura se clasifican en:

- **Punto a punto.**
- **Punto a multipunto o estrella**, donde varios puntos están hablando con un punto de acceso central. Es decir, hay una estación base y otras remotas dispersas por zona de cobertura.
- **Red malla o ad hoc:** es una red multipunto a multipunto, no hay una autoridad central.

Según la clase de enlaces se definen:

- **Enlace descendente o downlink (DL):** comunicación en el sentido estación base a estaciones remotas.
- **Enlace ascendente o uplink (UL):** comunicación en el sentido estación remota a estación base.

Existen diferentes modos de explotación:

- **Simplex (SX)**: transmisión alternativa en uno u otro sentido. Requiere el uso de un conmutador (PPT o push to talk) para pasar de transmisión a recepción y se realiza con una o dos frecuencias portadoras.
- **Dúplex (DX)**: transmisión simultánea en ambos sentidos. Requiere frecuencias portadoras y el uso de un duplexor.
- **Semidúplex (SDX)**: transmisión simplex en una estación y dúplex en otra. Se utiliza cuando hay estaciones repetidoras. Requiere dos portadoras.

Los tipos de dúplex son:

- **Frequency Division Duplex (FDD)**: enlaces uplink y downlink separados en frecuencias.
- **Time Division Duplex (TDD)**: enlaces uplink y downlink usan la misma frecuencia, pero en intervalos de tiempo diferentes.

Los recursos de frecuencias son limitados por lo que debe optimizarse la relación R/B (velocidad de información /anchura de banda, bps/Hz).

La calidad del sistema de radiocomunicación se expresa por la tasa de bits erróneos (BER o Bit Error Rate):

- El medio de transmisión radio introduce perturbaciones tales como ruido e interferencias, que están presentes en la recepción y afectan a la calidad de la señal recuperada.
- El grado de afectación depende básicamente de la relación entre las potencias de la señal y las perturbaciones: señal deseada/ruido y señal deseada/interferencias. Para una calidad dada, estas relaciones deben superar unos valores umbrales determinados.

La información útil constituye el tráfico. Además, se intercambian otras señales para la supervisión de la comunicación, protección frente a perturbaciones o establecimiento y liberación de llamadas. Esta información supletoria se denomina genéricamente señalización.

La señalización puede intercambiarse junto con el tráfico (Señalización Asociada a Canal, SAC) o utilizando recursos específicos (Señalización por Canal Común).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que los sistemas de acceso múltiple se utilizan para compartir un recurso escaso (downlink o uplink, por ejemplo) entre varios usuarios. Destacan en función de la técnica de multiplexación:

- Acceso Múltiple por División de Tiempo: **TDMA**
- Acceso Múltiple por División de Frecuencia: **FDMA**
- Acceso Múltiple por División de Código: **CDMA**
- Acceso Múltiple por División de Frecuencias ortogonales: **OFDMA**
- Acceso Múltiple por división de frecuencia de portadora única: **SC-FDMA**

Algunas de las tecnologías inalámbricas pueden proporcionar servicios de banda ancha fija (la ubicación del usuario es relativamente fija) y servicios de banda ancha móvil (usuario en

movilidad). A continuación, se detallan algunas de las tecnologías más relevantes para este trabajo:

- Wi-Fi 

La tecnología Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) pertenece a la familia de estándares **IEEE 802.11**.

Opera en bandas de frecuencia libres (no requiere licencias), donde las más comunes son la banda de 2,4 GHz o la de 5 GHz con objeto de lograr redes de área local inalámbricas (WLAN).

La velocidad máxima y el alcance de las conexiones dependen de la versión del estándar utilizado, así como del número de usuarios conectados simultáneamente a un mismo punto de acceso, de los obstáculos entre el usuario y el punto de acceso y de entre otros factores.

Existen diferentes estándares que han ido evolucionando a lo largo de los últimos años para ofrecer mayores velocidades de transferencia y dar respuesta así a las demandas del mercado. En la actualidad, los estándares hacen uso de sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) para aumentar sus prestaciones y que lleguen a ofrecer tasas de Gbps.

En la siguiente tabla se detallan algunos de los estándares más extendidos:

Estándar	Banda frecuencias	MIMO	Velocidad máxima
802.11 (legacy)	2,4 GHz	-	2 Mbps
802.11a	5 GHz	-	54 Mbps
802.11b	2,4 GHz	-	11 Mbps
802.11g	2,4 GHz	-	54 Mbps
802.11n	2,4 y 5 GHz	4 <i>streams</i>	600 Mbps
802.11ac	5 GHz	4 <i>streams</i>	3,5 Gbps

Tabla 1: Evolución de los estándares Wi-Fi [11].

Existen también otros estándares que modifican los existentes para ofrecer un mayor alcance u otras especificaciones.

El alcance de una conexión es aproximadamente de los 30 metros en interiores y más de 100 metros en el exterior.

Hay que tener en cuenta las interferencias sufridas en la banda de frecuencia de 2,4 GHz, puesto que, al no requerir licencia para operar, muchos equipos del mercado la utilizan, sumado a que todas las redes Wi-Fi funcionan a la misma frecuencia.

Los dispositivos que requiere para su implementación son: placa de red inalámbrica, punto de acceso (AP, Access Point), router inalámbrico y antenas.

▪ **WiMAX** 

La tecnología WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) pertenece a la familia de estándares **IEEE 802.16** que se desarrolló para proporcionar una red inalámbrica fija de acceso metropolitano.

Históricamente se ha basado en soluciones como MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Service o Servicio Multicanal de Distribución Multipunto) [12] y LMDS (Local Multipoint Distribution Service o sistema de Distribución Local Multipunto) [13].

La velocidad máxima y el alcance de las conexiones dependen de la versión del estándar utilizado, del número de usuarios conectados simultáneamente a un mismo punto de acceso y de otros factores, que hacen que las velocidades de descarga en la práctica tiendan a ser menores que los máximos teóricos.

Consigue un alcance teórico de hasta 50 Km para accesos inalámbricos desde una ubicación fija y alrededor de 15 Km para accesos en movilidad. Permite una movilidad de usuario hasta 120 Km/h.

La tasa de transferencia promedio es de 70 Mbps, según la distancia y condiciones QoS.

Provee de roaming entre estaciones base a menos de 50 metros, así como de servicios de seguridad (autenticación de los nodos, cifrado de la información, integridad y autenticación de los mensajes).

En la actualidad, recoge dos variantes dentro del estándar 802.16:

- Uno de acceso fijo basado en el estándar **802.16d**, que establece un enlace radio entre la estación base y el usuario final.
- Otro de movilidad completa basado en el estándar **802.16e**, que presenta movilidad completa, lo que permite el desplazamiento del usuario de una manera similar a la que se puede dar con las redes celulares.

La última versión del estándar es IEEE 802.16m (WiMAX Release 2.0) que hace uso de sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) para aumentar las velocidades de transferencia de hasta 365 Mbps, pudiendo llegar a 1 Gbps mediante agregación de canales. La movilidad del terminal de usuario se incrementa hasta los 350 km/h, compatible con los trenes de alta velocidad. La latencia aproximada es de 60 ms.

WiMAX establece diferentes opciones de capa física, permitiendo soluciones que requieren visión directa con la estación base y otras que no. Si bien el estándar permite su uso en un amplio rango de frecuencias (hasta los 66 GHz), los perfiles que existen actualmente en el mercado o

que están en proceso de desarrollo para la certificación de equipos compatibles con WiMAX se limitan a las frecuencias de 2,5 y 3,5 GHz (con licencia) y a la frecuencia libre de licencia de 5,2 a 5,8 GHz, todos ellos para acceso fijo.

Los dispositivos que requiere para su implementación son: placa de red inalámbrica, punto de acceso (AP, Access Point), router inalámbrico y antenas. [14]

- **Satélite:**

Un satélite puede ser visto como un simple repetidor (excepto los llamados OBP) que replica a su salida lo que recibe a su entrada, lo que permite conectar dos terminales distantes sin necesidad de depender de una infraestructura local.

Las redes por satélite son, especialmente flexibles, y pueden ser desplegadas según las necesidades específicas del entorno. Tienen una cobertura prácticamente universal, siempre que exista una línea de visión directa entre el satélite y el usuario del servicio.

Son también un sistema de *backup* muy eficaz, al no estar sujetas a cortes debidos a desastres medioambientales como terremotos.

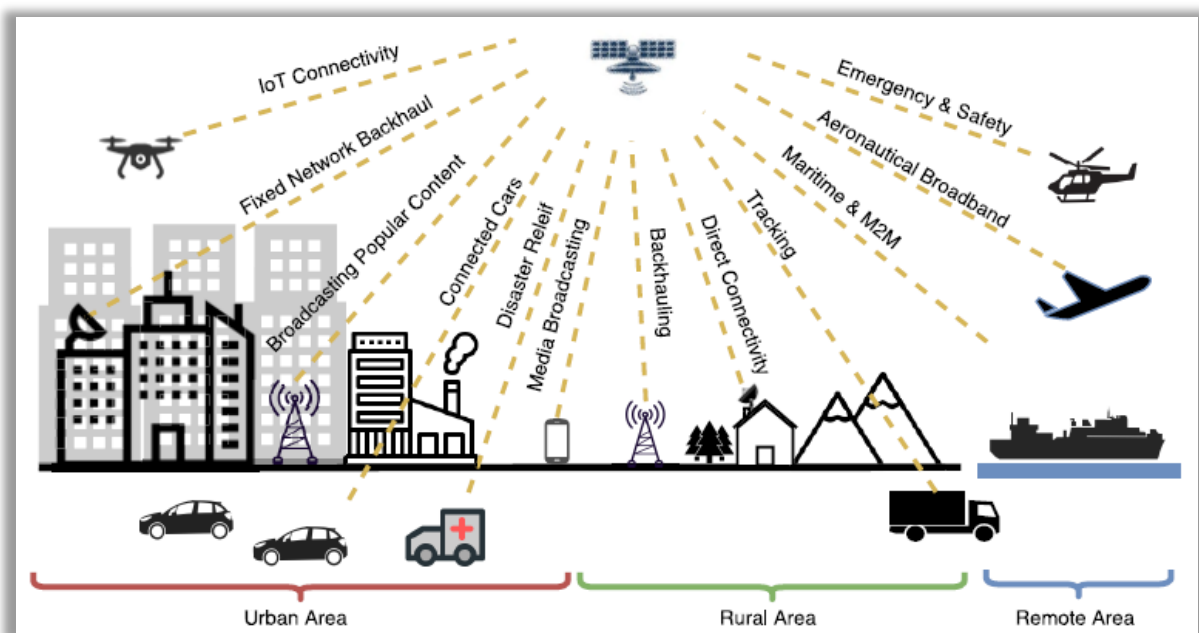


Figura 13: Ecosistema satelital [15].

El equipamiento necesario para el acceso de banda ancha a través de satélite consiste en un módem IP especial para satélite, así como la instalación en el domicilio del usuario de una antena externa con una unidad de transmisión bidireccional. La señal entrante se amplifica y luego es retransmitida en una frecuencia diferente.

Las velocidades máximas de los accesos de banda ancha por satélite dependen de factores como la calidad de la línea de visión entre satélite y usuario, la climatología o la disponibilidad de frecuencias electromagnéticas.

Asimismo, las conexiones pueden presentar mayor latencia (retardo) que, en los accesos basados en redes terrestres, debido a las largas distancias que deben recorrer las señales electromagnéticas. Aproximadamente, es de 120 ms.

Por otro lado, la disponibilidad de bandas de radiofrecuencia para las comunicaciones por satélite suele ser limitada, por lo que las velocidades ofertadas por los operadores de satélite pueden ser más reducidas que las de los accesos de banda ancha convencionales, basados en tecnologías cableadas.

El coste del lanzamiento de los satélites, así como el coste de sus componentes a prueba de fallos (debido a la dificultad de su mantenimiento una vez en órbita) encarece este tipo de comunicaciones y limita su uso a casos específicos.

En función de la topología de red usada, se pueden distinguir los siguientes tipos de redes satélite:

- **Point-to-point** (Punto a punto). Donde un terminal se comunica con otro usando un satélite como punto de conexión. El enlace puede ser unidireccional o bidireccional. Solo se necesita un salto para establecer una comunicación. Su fortaleza es su simplicidad y su debilidad, el coste de escalabilidad.
- **Star** (estrella o punto a multipunto). Cada uno de los terminales está conectado a un nodo central o hub, que establece las relaciones entre cada uno de estos, de modo que cualquier terminal se puede comunicar con cualquier otro. En este caso, se necesitan dos saltos para establecer una comunicación, uno de terminal y satélite y otro entre satélite y hub. Su fortaleza es la posibilidad de añadir más terminales al nodo de forma sencilla y su debilidad, el hecho que todas las comunicaciones pasan por el hub, de modo que este es un potencial cuello de botella y un punto único de fallo, pues de “caer” el hub, caería toda la red.
- **Mesh** (malla). Todos los terminales están conectados entre sí punto a punto, sin necesidad de nodo central o hub, lo que permite comunicarse con un solo salto. Los terminales suelen necesitar de antenas más grandes que en el caso de la tipología de estrella. Su fortaleza es conectar múltiples terminales con un único salto (menor retraso) y sin necesidad de hub. Sin embargo, su punto débil es la necesidad de usar mayor potencia en los terminales, lo que incrementa el coste de la red al incrementar el número de terminales.
- **Redes híbridas**. Son una mezcla de redes en estrella y malla. Permiten que un hub se comunique con los terminales, a la vez que estos se pueden comunicar directamente con el resto terminales de la red.

Existen multitud de estándares de comunicación para las redes de satélite, que tratan de responder a las diferentes necesidades de cada una de estas redes. A medida que los módems y los algoritmos de comunicaciones avanzan, surgen nuevos estándares que permiten comunicarse con mayor velocidad y/o flexibilidad. [14]

Ejemplos de aplicaciones de comunicaciones por satélites disponibles para el medio rural son mostradas en [16,17,18].

- **Celulares o móviles:**

Estas redes han ido evolucionando a lo largo del tiempo:

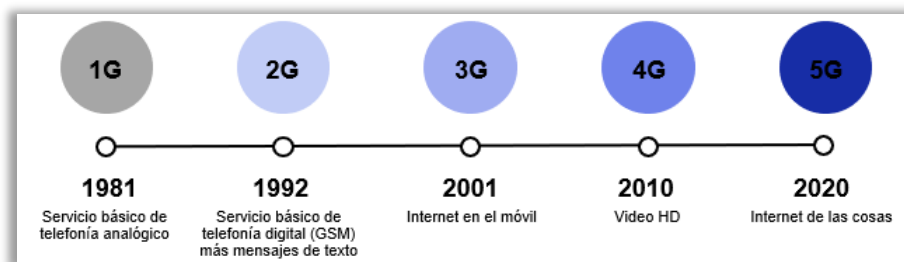


Figura 14: Evolución redes celulares.

El sistema de **primera generación**, 1G, es un sistema analógico de frecuencia modulada (FM) que ofrece únicamente servicios de voz. La calidad de las llamadas es baja y la velocidad es de 2,4 Kbps.

La **segunda generación**, 2G o GSM (*Global System for Mobile phone communications*). Se basa en la transmisión de información mediante la conmutación de circuitos y utiliza una modulación digital de frecuencia. Introduce servicios como la transmisión de mensajes cortos SMS (Short Message Service) o la posibilidad de utilizar el móvil para la conexión de datos a una velocidad de 9,6 Kbps.

La tecnología **2.5G** o **GPRS** (*General Packet Radio System*) utiliza conmutación de paquetes y es más viable que GSM para la conexión a internet, dado que el establecimiento de conexión es muy rápido, inferior al segundo. La velocidad de transferencia es variable y depende del número de slots (intervalos de tiempos) que se utilicen para la transmisión de datos, pudiendo llegar a una velocidad de 56 Kbps usando los 8 disponibles.

La tecnología **2.75G** es una evolución de la 2.5G, conocida como **EDGE** (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*), que hace uso de una técnica de modulación mejorada, con una mayor eficiencia espectral, que permite conseguir velocidades promedio de 110-130 Kbps y una velocidad pico de 473 Kbps en canales de 200 kHz.

La **tercera generación** de telefonía móvil celular o **3G** se caracteriza por la convergencia de voz y datos a través de servicios IP. Las velocidades de transferencia llegan hasta los 2 Mbps.

La familia de los sistemas de 3G se denomina mediante las recomendaciones hechas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), a través de su conjunto de estándares conocido como IMT-2000 (International Mobile Telecommunications - 2000).

Se definen tres tipos de tecnologías según la zona geográfica:

- **UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System). Sistema europeo que se ve como una actualización lógica de GSM. Utiliza CDMA (acceso múltiple por división de código).
- **CDMA2000** (Code Division Multiple Access 2000): sistema de 3G basado en versiones anteriores de CDMA usados principalmente por los norteamericanos.
- **TD-CDMA** (Time Division CDMA). Estándar 3G desarrollado en China, basado en CDMA, que utiliza TDD en lugar de FDD como método de acceso al medio.

Las redes UMTS se han mejorado mediante la especificación HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), que a veces se califica como una tecnología **3.5G**, que permite aumentar las tasas teóricas de bajada de 14,4 Mbps y HSDPA+ (High Speed Packet Access Evolved) que es una combinación de HSDPA y HSUPA, donde en la release 8 se utiliza MIMO para transmitir varias señales en paralelo, llegando hasta los 42 Mbps de bajada.

La **cuarta generación** de telefonía móvil viene definida por las recomendaciones hechas por la ITU mediante los estándares IMT-Advanced. El objetivo de la telefonía 4G es la convergencia de la banda ancha fija y móvil mediante la evolución de la red hasta estar basada completamente en tecnología IP, utilizar conmutación de paquetes y la integración de los diferentes tipos de accesos (fijo-móvil), así como una capa de servicios común para que todos los usuarios finales puedan hacer uso de los servicios multimedia en la red móvil.

Una de las principales tecnologías que ha permitido el paso a la 4G es la **LTE** (Long Term Evolution), tecnología que puede proporcionar velocidades de transmisión mayores a los 100 Mbps.

LTE es una tecnología definida por el 3GPP (3 Generation Partnership Project), en la que participan los principales operadores y fabricantes. Utiliza un sistema de múltiples antenas MIMO para minimizar los errores de datos y mejorar la velocidad. El sistema radio está basado en OFDM.

LTE permite utilizar anchos de banda variables (de 1 hasta 20 MHz) en varias bandas de frecuencia, según el tipo de servicios que se desee proporcionar y la zona. La arquitectura está dividida en tres partes:

- Equipos de usuario: dispositivos (teléfonos inteligentes, tabletas, etc.)
- Acceso universal de radio terrestre evolucionado (E-UTRAN): permite la conexión entre el núcleo de la red y el usuario. La gestión de los recursos de radio se realiza mediante una asignación dinámica a los equipos de usuario.

- Núcleo de paquetes evolucionado (EPC): el núcleo de la red está basado en IP, lo que permite la coexistencia con otras tecnologías. Da soporte a la interconexión con GSM, UMTS, HSPA, WiMAX o Wi-Fi (entre otras).

La arquitectura LTE es muy simple: cada radio base se comunica directamente con el núcleo de red, lo que permite reducir el coste del desarrollo y mantenimiento de la red.

Sin embargo, según las especificaciones del IMT, el LTE no es acorde con las velocidades del 4G, a pesar de que muchos fabricantes y operadores hayan etiquetado con estas siglas sus productos y servicios LTE. Se trata más bien de razones de marketing.

La evolución del LTE es LTE-Advanced, que sí es conforme a las especificaciones de la 4G del IMT. Se trata de una tecnología totalmente compatible con LTE, pero que permite mejorar la tasa de transferencia de datos, consiguiendo tasas de 100 Mbps en alta movilidad y 1 Gbps a baja movilidad, velocidades que permiten calificarla realmente como 4G.

El **5G** es el sucesor del 4G, y aporta, además de un aumento en las velocidades de transmisión, mejoras significativas en los tiempos de latencia y la conexión de múltiples dispositivos, lo que ha abierto la puerta a todo tipo de nuevas aplicaciones donde un gran número de elementos están interconectados entre ellos. Además, ofrece mayor ancho de banda y hará un uso aún más intensivo del sistema MIMO para aumentar la eficiencia del sistema.

De manera general, los dispositivos que se requieren para la implementación de un acceso radio consisten en estaciones base, antenas y un dispositivo de usuario (móvil o tablet) donde se integrará una tarjeta SIM. Para proporcionar un acceso fijo será necesario en lugar del móvil o tablet, un router inalámbrico que lleve integrada una tarjeta SIM. [14]

2.2. Proyectos similares

En la actualidad ya se están haciendo despliegues en todo el mundo dentro del denominado WiMAX fijo.

En concreto, en España se han desarrollado proyectos para prestar servicios de banda ancha en entornos corporativo y municipales. A continuación, se mencionan algunos:

- Instalación en campus universitarios de Cáceres y Badajoz que posibilitará el acceso a la red de datos de la Universidad desde los exteriores del campus. Operativa desde el 30 de septiembre de 2005. [19]
- Aragón se une a las comunidades autónomas españolas que dispondrán de WiMax en sus zonas rurales. La red inalámbrica ha sido desplegada por Telefónica y Embou con financiación del Gobierno de Aragón. [19]

También se han desarrollado trabajos dentro de la UOC donde se ofrece cobertura WiMAX en algún municipio o entornos corporativo y municipales. Se trata por ejemplo de:

- “*Diseño de una Red Inalámbrica de Banda Ancha para un Entorno Rural*”, de Antonio González Calvo.

3. Diseño del sistema

Para llegar a cabo el diseño de un sistema de red que proporcione servicios de banda ancha en las zonas rurales del territorio español, en primer lugar, es necesario considerar algunos factores como el entorno en el que se pretende habilitar la red, el tipo de uso que se le quiere dar y sobre todo el coste.

Una vez analizadas y establecidas estas bases, se realizará una propuesta de solución. En esta propuesta, se decidirá qué tecnología de las actuales es la más adecuada y se realizará una descripción de la arquitectura y los elementos principales con los que debe contar el sistema de red.

3.1. Características del entorno

Las principales características que presentan los entornos rurales en España son:

- Terrenos extensos y amplios con conjuntos de formas naturales complejas e irregulares con numerosos desniveles como, por ejemplo, cordilleras, cerros y valles. Algunas zonas presentan exuberante vegetación y se encuentran en zonas protegidas (ej.: geoparques, reservas, etc.) y con unas condiciones climáticas extremas.
- Baja densidad y elevada dispersión poblacional.
- Carencia de infraestructura y servicios básicos (transporte, suministros eléctricos, telecomunicaciones, vías de acceso, etc.).
- Las principales actividades económicas que se desarrollan están relacionadas con el sector primario como la agricultura, la ganadería, la caza y pesca, que en general cuenta con una rentabilidad media menor y tienen una mayor dependencia de las condiciones climáticas y naturales. Este menor desarrollo productivo incide en el PIB per cápita: menor renta.
- Baja tasa de empleo.
- Dificultad en la conciliación de la vida personal con la vida laboral.
- Elevada tasa de riesgo de pobreza y exclusión social.
- Envejecimiento y masculinidad.
- Falta o niveles bajos de formación y/o conocimientos. [20]

3.2. Tipo de uso

Se identifican diferentes áreas de intervención según las decadencias identificadas actualmente en las zonas rurales que contribuyan a su mejora y se consiga hacer frente a fenómenos asociados como la despoblación, la reducción de la pobreza, la brecha digital y de género, la inclusión, la empleabilidad, la formación, protección ambiental y al cambio climático, cohesión territorial, etc.

En este sentido, se plantean las siguientes actuaciones:

- Educación a distancia.
- Servicios sanitarios: telemedicina, teleasistencia para personas mayores y/o en situación de dependencia.
- Servicios públicos: administración electrónica, disponibilidad sistemas de alerta temprana de fenómenos como olas de calor y mejor comunicación con colectivos de mayor riesgo o gestión del agua para anticiparse a los elevados picos de consumo.
- Ámbito personal: servicios multimedia como videoconferencias, video bajo demanda o televisión, acceso a la información digital, etc.
- Turismo, que contribuya a identificar nuevos recursos turísticos a través de la visibilidad de los atractivos turísticos, así como de establecimientos de alojamiento y restauración o de la creación de coworking.
- Servicios digitales para empresas: digitalización de procesos (venta electrónica, oficina en la nube, marketing digital, ciberseguridad, entre otros), teletrabajo, etc.

Y, en definitiva, servicios de alta capacidad.

3.3. Coste

Se debe contemplar modelos operativos ágiles y de bajo coste en la prestación de los servicios, de tal manera que:

- Se tiene que requerir poco o ningún mantenimiento técnico especializado ya que la solución tecnológica estará lejos y no de suponer un coste la resolución de problemas. El personal técnico especializado suele encontrarse en las ciudades.
- Robusta y fácil de usar, ya que los usuarios van a ser poco cualificados y no contarán con un apoyo continuado de asesoramiento.
- De bajo consumo para que tampoco aumenten los costes de mantenimiento.
- Los precios deben ser atractivos para que los habitantes de las zonas rurales puedan asumirlos puesto que éstos tienen una renta per cápita inferior a la de las zonas urbanas.

- Es necesario innovar para reducir aún más los costes y aplicar nuevos modelos de ingresos que atraigan a los clientes de las zonas rurales para que se inscriban en los servicios de internet.

En definitiva, debe tener costes de despliegue y de operación bajos. Además, de ofrecer precios atractivos para los clientes finales (abonados rurales).

3.4. Solución propuesta

En este apartado se describe la arquitectura y los elementos principales de la solución propuesta para el sistema de red.

Para ello, será necesario seleccionar la tecnología de red más adecuada tomando en consideración todos los requerimientos, así como realizar un estudio en detalle de dicha tecnología.

3.4.1. Elección de la tecnología

Teniendo en cuenta los apartados anteriores se descarta la implementación vía cable o fibra óptica para este trabajo ya que no cumpliría los requerimientos según las características del entorno y el coste. Estos tipos de accesos supondrían un mayor impacto ambiental puesto que requerirá en numerosas ocasiones de construcción de obra civil nueva, así como un mayor coste en la instalación, mantenimiento y operación y menos escalabilidad.

Las comunicaciones inalámbricas son la solución más viable para realizar las interconexiones de telecomunicaciones en las zonas rurales debido a que no requieren de cable y su coste en la instalación, mantenimiento y operación es menor. Su aplicación es ideal para geografías complicadas como se pueden dar en entornos rurales.

De las redes inalámbricas, se descartan para este trabajo las redes WBAN y WPAM puesto que el rango de cobertura que ofrecen es inferior a 10 m.

También se descartan las redes celulares o móviles puesto que las velocidades picos solo se obtendrían si se dispone de un idóneo dimensionamiento de la red. En lo que respecta a la velocidad de conexión y la estabilidad de este tipo de redes, puesto que el ancho de banda se comparte entre usuarios, depende de los usuarios que estén conectados, del uso que éstos estén dando a la red, de la distancia a la que estén de la estación base, así como de las interferencias que puedan darse. Además, la velocidad ofrecida por los diferentes operadores no es suficiente en la actualidad (no supera los 27,9 Mbps de bajada en 4G). También existe una limitación máxima por consumo de datos y la latencia no es lo suficientemente baja para disfrutar de ciertos

servicios. El 5G sí ofrece mejor latencia, pero actualmente su despliegue no está presente ni estandarizado completamente en todo el territorio español.

Las redes satelitales ofrecen una mayor disponibilidad y cobertura, pero tampoco son una opción idónea por el elevado coste que suponen y por su elevada latencia, lo que se traduce en una desventaja para disfrutar de servicios online como videollamadas. Además, la navegación no es ilimitada, la velocidad de las conexiones vía satélite no está garantizada y puede oscilar en función de la carga de la red o de las condiciones meteorológicas que pueden causar limitaciones adicionales en la disponibilidad. Hay que tener en cuenta también que debido a los altos costes de implementación que supone esta red, no se está avanzando en el desarrollo de esta tecnología.

Por otro lado, Wi-Fi y WiMAX ofrecen prestaciones muy similares en los siguientes aspectos:

- Bajo coste y rápido despliegue.
- Fácil de configurar.
- Flexibilidad.
- Bajo consumo de potencia.
- Ambos definen topología de red punto a punto y redes malla o ad hoc.

Sin embargo, WiMAX ofrece mejores ventajas frente a Wi-Fi es los siguientes aspectos:

- Mayor alcance, abarca muchos kilómetros, que utiliza el espectro con o sin licencia. Wi-Fi utiliza el espectro sin licencia para proporcionar acceso a una red local.
- Mayor ancho de banda.
- Mayor calidad del servicio. WiMAX y Wi-Fi tienen diferentes mecanismos de calidad del servicio (QoS). WiMAX utiliza un mecanismo sobre la base de las conexiones entre la estación base y el dispositivo de usuario (cada conexión se basa en algoritmos de programación específicos) mientras que Wi-Fi utiliza acceso de contención (todos los terminales de usuario que deseen pasar datos a través de un punto de acceso inalámbrico están compitiendo por la atención de dicho punto de acceso en una base a una interrupción aleatoria). Esto puede causar que terminales de usuario distantes del punto de acceso puede ser interrumpidos varias veces por los terminales más cercanos, lo que reduce en gran medida su rendimiento.
- Mayor velocidad.
- Ofrece la posibilidad de asignar diferente ancho de banda a cada canal de radio. Esto permite la posibilidad de reutilizar frecuencias y dar una mejor planificación de las celdas, lo que hace que el número de canales no interferentes entre sí dependa únicamente del ancho de banda disponible. En cambio, la banda de frecuencia de 2,4 GHz de Wi-Fi sufre grandes interferencias, puesto que, al no requerir licencia para operar, muchos equipos del mercado la utilizan, sumado a que todas las redes Wi-Fi funcionan a la misma frecuencia, además de que tiene un número limitado de canales no interferentes.
- Posibilidad de realizar enlaces punto a punto o a multipunto y malla o estrella.

- Numerosos servicios añadidos: permite la prestación de otros servicios como la transmisión de videos en streaming, telefonía fija (número nuevo o portabilidad, bonos de llamadas gratis), etc.
- Baja latencia. Esta permite hacer entre otras actividades videoconferencias.
- La tecnología mejora año tras año y se adapta cada vez con más velocidad al mercado. La actualización de los equipos no requiere de inversiones estratosféricas como en el caso del satélite.
- Servicio de internet ilimitado. Se puede navegar y descargar lo que se quiera sin limitaciones.

Por lo tanto, WiMAX ofrece la mejor solución para este trabajo.

Cabe destacar también que ambas tecnologías se pueden complementar para proporcionar las mejores soluciones (WiMAX para puntos de largas distancias y Wi-Fi para coberturas más cercanas entre la población).

El eje fundamental de la tecnología WiMAX es su flexibilidad. Las empresas han perdido tanto dinero al implementar diferentes tecnologías que no van a volver a cometer esos errores.

*Dr. Mo Shakouri
Presidente de marketing de WiMAX Forum*

3.4.2. Análisis de la tecnología elegida: WiMAX

Ante las características expuestas en las secciones anteriores se hace necesario contar con una tecnología que permita una conexión remota a velocidades de banda ancha y con garantías de seguridad. Adicionalmente, dicha solución debe ser implementable sin elevados requerimientos de infraestructura y coste. Para ello, la tecnología escogida para realizar la propuesta tecnológica es WiMAX.

WiMAX es un consorcio de distintas empresas que se formó en abril del 2001 con el objetivo de asegurar la interoperabilidad y el mantenimiento de la norma 802.16-2001 por parte de los productos de acceso de banda inalámbrica.

Dentro del grupo de trabajo de IEEE 802.16, desarrollan estándares y recomendaciones prácticas para dar soporte al desarrollo y uso de las redes inalámbricas de área metropolitana o WMAN. Por lo tanto, cuando se menciona WiMAX se puede estar refiriendo tanto a la norma 802.16 como a sus variantes.

En la siguiente Figura puede verse un esquema de la evolución de WiMAX a lo largo del tiempo:

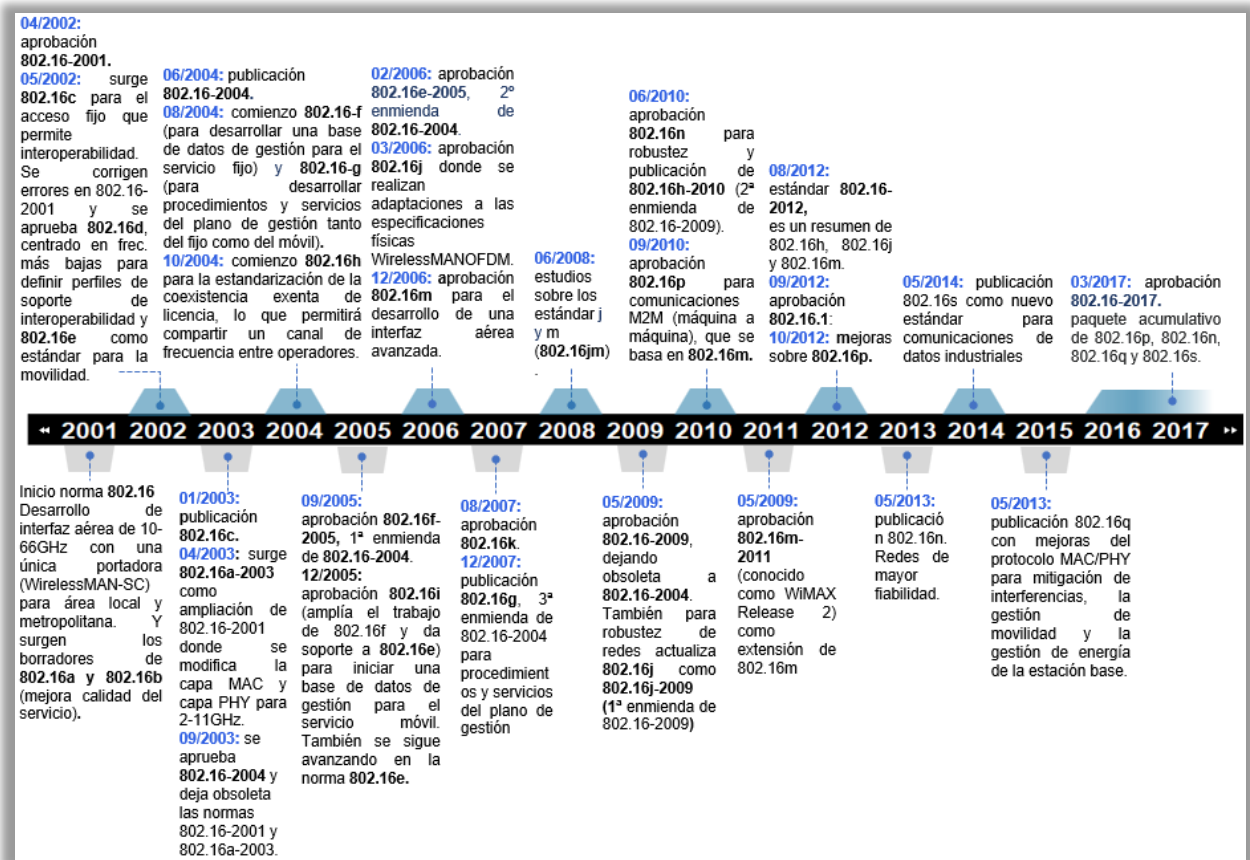


Figura 15: Evolución del estándar IEEE802.16 a lo largo del tiempo [21,22].

3.4.2.1. Elementos de la red

En la Figura 17 puede verse un esquema general de la arquitectura de una red fija de acceso inalámbrico de banda ancha 802.16 – WiMAX:

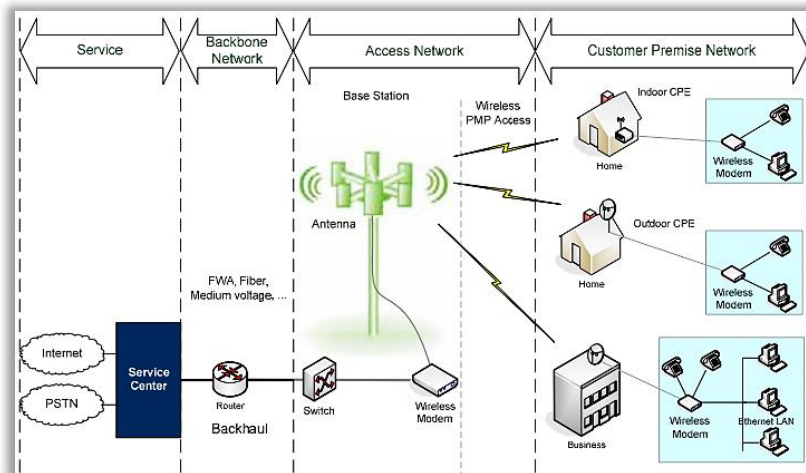


Figura 16: Arquitectura WiMAX [10].

La red compuesta por dos elementos clave: estación base (BS, Base Station) y terminal del usuario o estación suscriptor (CPE, Customer Premises Equipment).

- **Estación base (BS, Base Station).**

Es la parte de la red que se conecta a la red troncal o núcleo de red y cuya función es establecer el enlace radio con los terminales de usuarios o estaciones suscriptoras (CPE) que se encuentran dentro de su área de cobertura para enviar y recibir servicios de banda ancha de alta velocidad.

Transmite y recibe información hacia/desde los CPEs utilizando dos enlaces inalámbricos en frecuencias distintas (downlink y uplink).

La estación base albergará los servidores, firewalls y controladores de los equipos WiMAX. Estos equipos deberán ser alojados en contenedores o casetas prefabricadas (Ej.: 5m²) o si no hay posibilidad de poner estos contenedores prefabricados:

- Si el espacio contratado está dentro de un edificio, se habilitará un espacio y se construirá con medidas y elementos lo más similares a los contenedores prefabricados.
- Si el espacio contratado es exterior y por economía no se desea poner un contenedor, el espacio se habilitará con bancadas y armarios donde alojar los equipos.

Los contenedores y las habitaciones estarán también diseñados para contener los demás elementos de infraestructura como son los cuadros de distribución de corriente alterna, la climatización (extractores, aires acondicionados, etc.), los cuadros de fuerza de corriente continua con su distribución y baterías, detectores de humo, detectores de presencia, centralita de alarmas, soportes para la fijación de los cables, luminarias y posibilidad de alojar otros equipos como los de transmisión, balizamiento o de cualquier otro servicio.

De este contenedor/habitación saldrán los cables de radiofrecuencia para llevar las señales del downlink y uplink hasta el sistema de antenas, que está típicamente en la parte alta de un mástil. Las antenas, los cables de radio frecuencia y el mástil son elementos pasivos que sirven para conducir las señales radio eléctricas entre el aire y la estación base.

La unidad de antena representa la parte exterior de la estación base, y está compuesta por una antena, un duplexor, un equipo de radiofrecuencia (RF), un amplificador de bajo ruido y un convertidor de bajada/subida. La elección de las antenas tiene un gran impacto en la capacidad y cobertura del sistema.

Además, la estación base se compone de uno o varios transceptores de radio, cada uno de los cuales se conecta a varios CPE dentro de un área sectorizada. Se necesita una antena sectorial direccional para cada sector.

Las antenas sectoriales consisten en un grupo de antenas direccionales, cuya configuración puede variar de distinta forma, debido a que pueden existir estaciones con 1 sector, 2 sectores a 180 grados, 4 sectores a 90 grados, 8 sectores a 45 grados, etc.

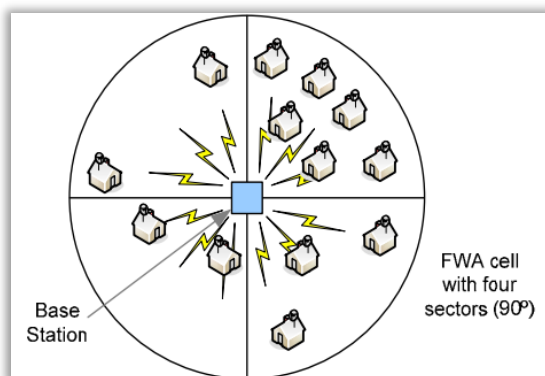


Figura 17: BS con cuatro sectores [10].

La estación base es capaz de manejar sectores independientes simultáneamente por lo que la elección del número de sectores dependerá del tipo de antena y de la zona de cobertura.

La capacidad de un único sector se divide entre todos los usuarios del área de cobertura del sector, así como que depende del ancho de banda del canal y de la eficiencia espectral del esquema de modulación y codificación utilizado.

Los sistemas WiMAX aprovechan la modulación y codificación adaptativa lo que significa que dentro de un sector de la estación base, cada CPE puede utilizar el tipo de modulación y codificación más adecuado independientemente de los demás.

Los equipos de la estación base multiplexan el tráfico de varios sectores y proporciona una interfaz con la red troncal o núcleo de red. El multiplexor (como un conmutador) agrega el tráfico de los distintos sectores y lo reenvía a un enrutador conectado a la red IP troncal del proveedor de servicios. La conexión troncal puede realizarse mediante un enlace de radio punto a punto o un cable de fibra, y puede estar basada en IP o ATM.

La distancia entre los equipos instalados al cliente (CPE) y la estación base depende de cómo se diseñe el sistema y de la banda de frecuencias en la que opere.

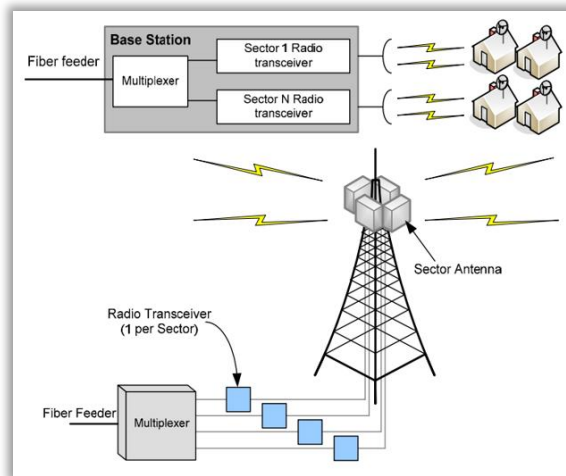


Figura 18: Componentes Estación Base (BS) [10].

- **Terminal del usuario o estación suscriptor (CPE, Customer Premises Equipment)**
Estos equipos permiten a un usuario acceder a la red WMAN. Hay dos tipos principales de unidades CPE: uno interior (IDU) y, para un alcance más largo, uno exterior (ODU).

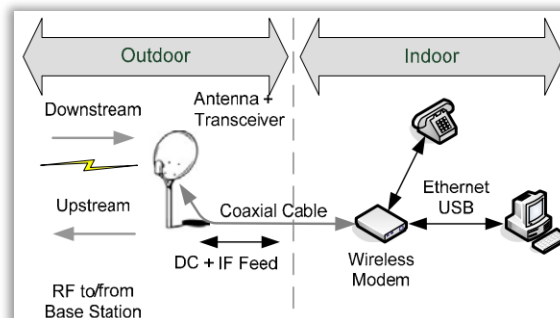


Figura 19: Equipamiento del usuario o CPE (exterior/interior) [10].

El CPE exterior o ODU será instalado en el exterior de un edificio o vivienda (azotea, pared, etc....) donde llevar la cobertura y con una antena que apunta directamente a la estación base (BS) a la que se conecta.

Esta unidad de CPE exterior debe incorporar una antena que deberá ser instalada un técnico especializado, lo que permite mejorar la calidad de la transmisión.

El CPE interior o IDU estará formada por un módem que proporcionará una interfaz entre la red del usuario y la red fija de acceso inalámbrico de banda ancha.

Esta unidad de CPE interior se sitúan en el interior de un edificio o vivienda y puede ser autoinstalado por el usuario.

La señal de radiofrecuencia recibida de la estación base proporciona una interfaz entre el módem y la antena.

Algunos proveedores integran el módem y la antena para formar un CPE compacto, mientras que otros tienen los componentes como sistemas independientes.

El tipo de antena depende del tipo de visión del sistema. Con una visibilidad directa, las antenas son muy direccionales. Sin visibilidad directa, el ancho de haz de la antena suele ser mayor, y en el caso de las antenas interiores debe ser omnidireccionales.

- **Otros elementos: repetidor**

Otro elemento de red con el que se pueden contar son los denominados repetidores.

Un repetidor es un amplificador bidireccional que selecciona o filtra los canales o la banda de una operadora para amplificarlos y retransmitirlos, por lo que permitirá extender la cobertura en zonas carentes de línea de vista con la estación base.

Es un elemento de gran utilidad para llegar a clientes que se encuentran a distancias muy elevadas o detrás de obstáculos naturales que impiden que llegue la señal y queda básicamente definido por dos parámetros:

- Potencia que es capaz de dar
- Ganancia que es capaz de soportar

3.4.2.2. Arquitectura interna

Para entender el funcionamiento de la arquitectura interna de WiMAX, se tiene en cuenta que el estándar 802.16 define una capa física (PHY) y sobre todo se centra en especificar la capa de control de acceso al medio o MAC (Medium Access Control) de acceso inalámbrico en banda ancha fija o móvil del modelo OSI.

En la Figura 20, puede verse una representación gráfica:

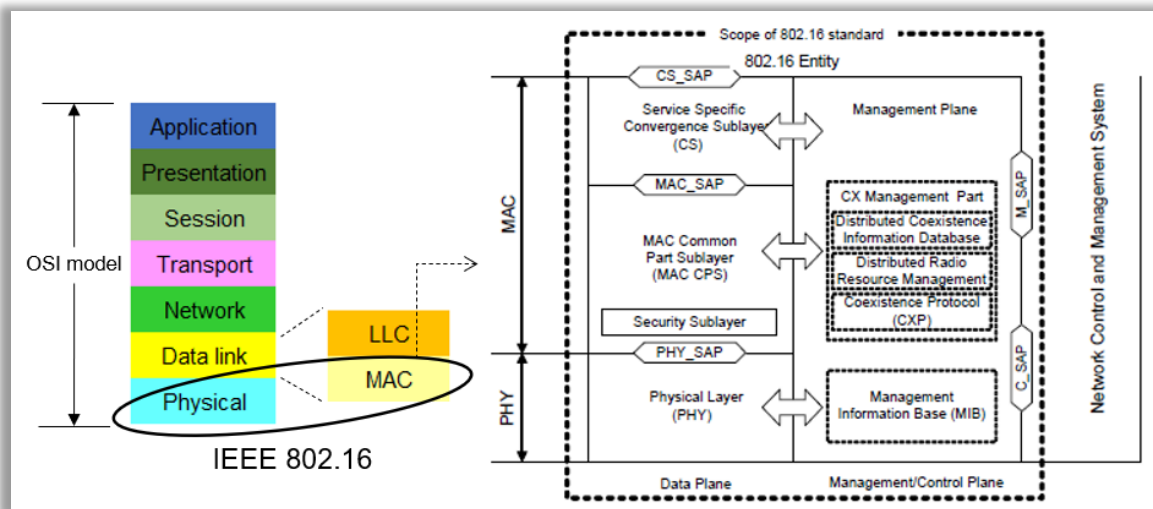


Figura 20: Àmbit de aplicació IEEE 802.16 [23].

Los componentes principales son el plano de datos y el plano de gestión y control.

La capa MAC cuenta con tres subcapas:

- **CPS** o subcapa de parte común: realiza la asignación del ancho de banda, el establecimiento y mantenimiento de conexión.
- **CS** o subcapa de convergencia específica de servicio: es definida para que la subcapa CPS sea independiente del tipo de tráfico cursado, de tal manera que soporte varios protocolos en la capa superior como ATM (Asynchronous Transfer Mode), IP (Internet Protocol) o Ethernet.
- **Subcapa de seguridad:** lleva a cabo tareas de autenticación, intercambio seguro de claves y el cifrado.

En la capa física (PHY) se definen diferentes especificaciones con el fin de adaptarse a distintas aplicaciones y rangos de frecuencia. En la Tabla 2 se especifican:

Designación	Aplicabilidad	Duplexación
WirelessMAN-SC	10 – 66 GHz	TDD FDD
Fixed WirelessMANOFDM fijo	Por debajo de 11 GHz bandas con licencia	TDD FDD
Fixed WirelessMANOFDMA fijo	Por debajo de 11 GHz bandas con licencia	TDD FDD
WirelessMAN-OFDMA TDD	Bandas con licencia por debajo de 11 GHz	TDD
WirelessMAN-OFDMA FDD	Bandas con licencia por debajo de 11 GHz	FDD
WirelessMAN-OFDMA MR	Bandas con licencia por debajo de 11 GHz	TDD
WirelessHUMAN	Exentas de licencia por debajo de 11 GHz	TDD
WirelessMAN-CX	Exentas de licencia por debajo de 11 GHz	TDD
WirelessMAN-UCP	Exentas de licencia por debajo de 11 GHz	TDD

Tabla 2: Modos funcionamiento capa física (PHY) [23].

También está preparado para permitir definir a futuro nuevas especificaciones. En cada implementación, se deberá elegir solo una especificación de PHY.

Las capas MAC y PHY se comunican a través de interfaz PHY SAP (Service Access Point), por donde se intercambian datos, información de control y estadísticas.

3.4.2.3. Características

WiMAX está siendo desarrollado para conexiones fijas (IEEE 802.16d) y para ofrecer movilidad (IEEE 802.16e).

Como se ha mencionado anteriormente, en este trabajo se llevará a cabo solo el caso de redes fijas (IEEE 802.16d) por lo que no se hablará de lo relacionado con la movilidad.

A continuación, se muestra un esquema general de los principales características y parámetros del estándar WiMAX fijo:

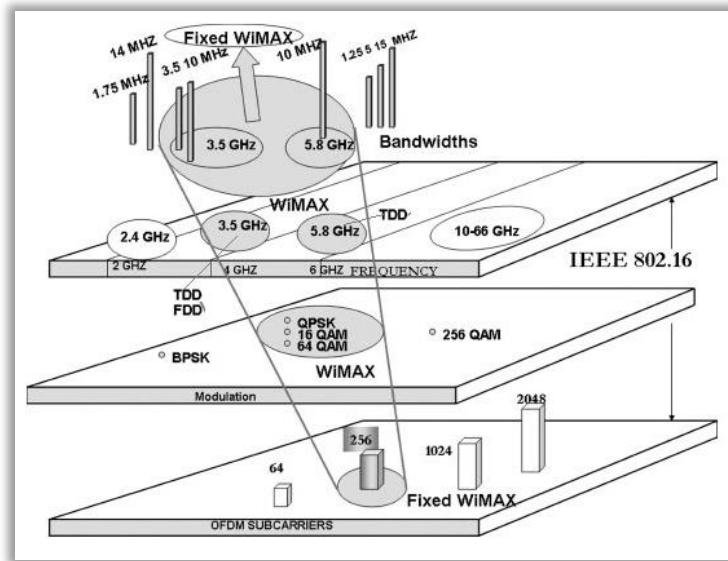


Figura 21. Características principales y parámetros del estándar WiMAX fijo [24].

WiMAX puede trabajar a diferentes frecuencias. Algunas de ellas requieren una licencia de uso mientras que en otras no es necesario. En la Tabla 3 se detallan:

Banda	Frecuencias	¿Se requiere licencia?
2.5 GHz	2.5 – 2.69 GHz	Sí
3.5 GHz	3.3 – 3.8 GHz	Sí
5 GHz	5.25 – 5.85 GHz	No

Tabla 3: Bandas y frecuencias disponibles en WiMAX [23].

Además, trabaja en un rango de frecuencias comprendido entre 10 y 66 GHz, lleva a cabo redes punto a punto, punto a multipunto y redes de malla o estrella, ofrece numerosos servicios (voz, datos y video) así como que permite regular los niveles de potencia en las estaciones base con la implementación de algoritmos. Con ello se logra un ahorro de potencia consumida en los CPE (Customer Premise Equipment).

Otras características importantes se detallan a continuación:

- **Modulación**

La codificación que sigue la norma 802.16, se trata de una modulación OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales). Se realiza en la capa física y se compone de cuatro pasos: aleatorización, FEC (Forward Error Correction), interleaving y modulación.

OFDM se basa en el proceso matemático llamado FFT (Transformada de Fourier) que permite solapar 52 canales sin perder sus características individuales (ortogonalidad). Esto supone un uso más eficaz del espectro y permite procesar los canales en el receptor.

OFDM es una modulación que consiste en enviar la información modulando en QAM (Quadrature Amplitude Modulation) o PSK (Phase Shift Keying) un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias.

El uso de OFDM está bastante extendido gracias a su resistencia a las interferencias y a las degradaciones de la señal. Esto es posible debido a que las frecuencias, siendo ortogonales entre ellas, eliminan las interferencias entre ellas.

En definitiva, OFDM transmite una señal inalámbrica mucho más lejos con menos interferencias que otras tecnologías sin OFDM.

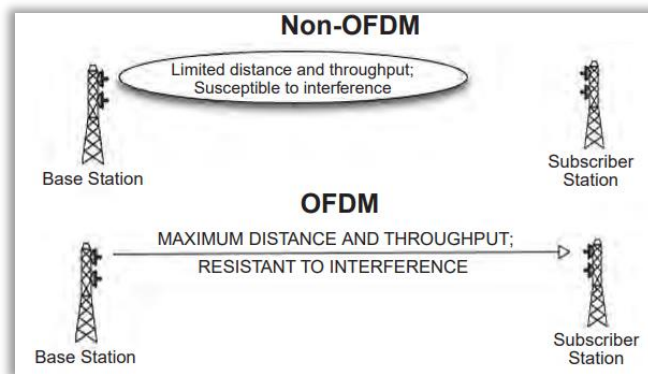


Figura 22: Señal inalámbrica sin OFDM y con OFDM [25].

El estándar 802.16 define que la modulación debe tener 256 subportadoras, de las cuales 192 son para transmitir datos, 8 para detectar cambios de fase y el resto se dejan como bandas de guarda que protegen frente a interferencias de canales adyacentes. En la siguiente Figura se muestra:

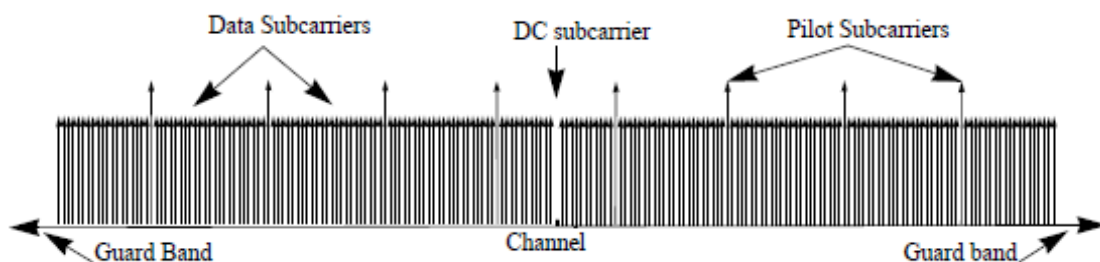


Figura 23: Descripción de frecuencias OFDM [23].

Nuevas modulaciones pueden ser consideradas para mejorar la capa física como las mostradas en los esquemas propuestos en [26,27].

- **Tramas**

WiMAX admite el funcionamiento de dos tipos de duplexado: TDD (Time division duplexing) y FDD (Frequency division duplexing) para los enlaces UL (Upload link o enlace de subida) y DL (Download link o enlace de bajada).

Por un lado, TDD es una técnica en la que el sistema transmite y recibe dentro del mismo canal de frecuencia, asignando segmentos de tiempo para los modos de transmisión y recepción. Proporciona una ventaja cuando un regulador asigna el espectro en un bloque adyacente.

Con TDD, la separación de bandas no es necesaria, como se muestra en la Figura 24. De este modo, toda la asignación de espectro se realiza en el mismo bloque. Así, la asignación de espectro se utiliza de forma eficiente tanto en sentido ascendente (UL) como descendente (DL) y cuando los patrones de tráfico son variables o asimétricos



Figura 24: Subtrama TDD [10].

Por otro lado, FDD requiere dos frecuencias separadas, generalmente entre 50 y 100 MHz dentro de la banda de operación.

En los sistemas FDD, las estructuras de trama del enlace descendente (DL) y ascendente (UL) son similares, salvo que el DL y el UL se transmiten en canales separados. Esto facilita el uso de distintas modulaciones y por tanto simplifica la reserva de ancho de banda.

Además, permite el uso de conexiones tanto dúplex como semidúplex. Cuando hay estaciones de usuario (SS) semidúplex FDD, la estación base (BS) debe asegurarse de no programar una (SS) semidúplex FDD para transmitir y recibir al mismo tiempo. La Figura 25 ilustra esta relación.

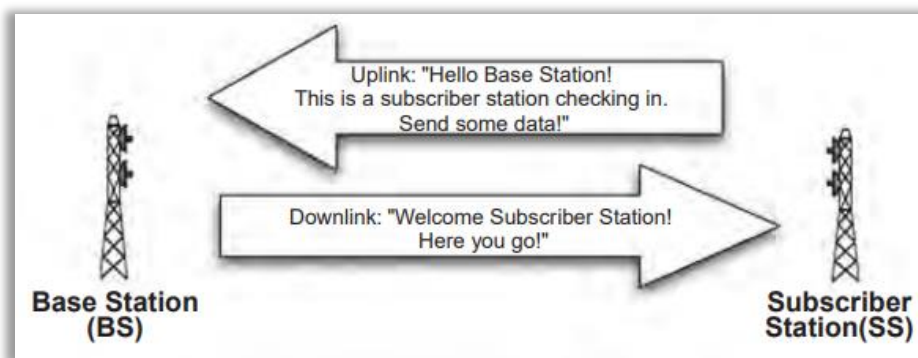


Figura 25: ULs y DLs entre BS y SSs [10].

- **Técnicas radio.** WiMAX hace uso de técnicas radio como:

- *Antenas inteligentes* que mejoran la eficiencia espectral y la cobertura.

El uso de sistemas de antena adaptada (AAS) que emiten un haz muy estrecho que se puede ir moviendo electrónicamente para enfocar siempre al receptor evita interferencias entre canales adyacentes y se consigue un menor consumo de potencia al ser un haz concentrado así como que mejora la reutilización de frecuencias. Esta técnica también se puede llamar beamforming o conformación de haz.[28]

- *La diversidad de transmisión* (opcional). Los esquemas de diversidad se utilizan para aprovechar el multitrayecto y la reflexión de las señales que se producen bajo condiciones NLOS.

Utilizando varias antenas (transmisoras y/o receptoras) es posible reducir el fading, las pérdidas de trayecto y las interferencias. Se trata de enviar/recibir lo mismo a través de varias antenas lo que mejora la fiabilidad.

La diversidad resulta ser una herramienta útil y efectiva para superar problemas que nos plantea la propagación NLOS.

- *MIMO* (Multiple Input Multiple Output): consiste en la utilización de varias antenas tanto en transmisión como en la recepción.

Utiliza muchas antenas receptoras y/o transmisoras para la multiplexación espacial. Cada antena podría transmitir datos diferentes que podrían ser enviados por diferentes caminos y ser decodificados en el receptor. MIMO logra aumentar la capacidad de una conexión inalámbrica sin necesidad de asignar más ancho de banda ni aumentar potencia.

Si se ponen múltiples antenas en transmisión y en recepción se puede aumentar el ancho de banda de una forma lineal con el número de antenas, siempre que no se garantice suficiente propagación multitrayecto.

- **Calidad del Servicio**

WiMAX aporta calidad de servicio (QoS) en NLOS de tal manera que la señal no se distorsiona drásticamente por la existencia de obstáculos o interferentes.

El diseño del protocolo WiMAX se basa en un enfoque orientado a la conexión y cada conexión se identifica con un identificador de conexión (connection identifier, CID). La identificación de cada conexión junto con sus requisitos de flujo de servicio proporciona a la capa MAC la QoS básica, que debe mantenerse para una conexión específica.

La conexión debe proporcionar un rendimiento sostenido garantizado. En las transacciones en tiempo real, las longitudes de los paquetes pueden ser pequeñas, pero deben entregarse sin errores y con un retraso mínimo.

Con el fin de abordar de manera efectiva diversas aplicaciones y garantizar una buena QoS, WiMAX ha definido diferentes servicios, cada uno con sus propios requerimientos y parámetros (latencia máxima, fluctuación máxima, tasas de datos máximas y mínimas y prioridad) para el transporte de datos:

- **UGS** (Unsolicited Grant Service o Servicio de concesión no solicitada): proporciona servicios en tiempo real que transporten paquetes de tamaño fijo de forma periódica.
- **rtPS** (Real-time Polling Service o Servicio de Consulta en Tiempo Real): soporta flujos en tiempo real con paquetes periódicos de tamaño variable.
- **Extended rtPS** (rtPS ampliado): pretende unificar las ventajas de UGS y rtPS.
- **NrtPS** (Non-real-time Polling Service o Servicio de consulta en diferido o en tiempo no real): ofrece unicast polls de forma regular, lo que asegura que el flujo tenga oportunidades para transmitir solicitudes de ancho de banda incluso con la red congestionada.
- **BE** (Best Effort Service o Servicio del mejor esfuerzo): los flujos BE deberán solicitar intervalos de transmisión y su solicitud solo será atendida si quedan slots libres después de dar servicio a los flujos con mayor prioridad.

- **Corrección de errores**

Las técnicas de corrección de errores se han incorporado a WiMAX para reducir la tasa de error de la señal del sistema a unos niveles admisibles.

Para detectar y corregir errores y mejorar el rendimiento se utiliza: Strong Reed Solomon FEC, (Forward Error Correction), Codificación Convolutiva y Algoritmos de Interleaving (ARQ).

Las técnicas de corrección de errores que son muy robustas (Strong Reed Solomon), ayudan a recuperar tramas erróneas que se podrían haber perdido debido al desvanecimiento selectivo en frecuencia o a una ráfaga de errores. Los errores que FEC no puede corregir se intentan corregir con ARQ, reenviando la información errónea. Esto mejora significativamente la tasa de error de bit (BER).

- **Seguridad:** WiMAX incluyen técnicas de criptografía y seguridad propias del sistema.

El mecanismo principal para establecer la seguridad inalámbrica en las redes WiMAX es el cifrado de paquetes de la capa MAC (Medium Access Control Protocol Data Units, MAC PDU) mediante el uso de un cifrado DES o AES. Para ello, la capa MAC dispone de una subcapa de privacidad, que realiza las funciones de autenticación del terminal de usuario y posterior encriptación de los paquetes de datos.

Para que el terminal de usuario pueda descifrar las MAC PDUs, se transmite una clave de autorización (Authorization Key, AK) desde la estación base al terminal del usuario en el

momento del registro de la estación base (y se actualiza periódicamente). La capa MAC define las PDU para la autorización y el proceso de intercambio de claves.

Cabe señalar que los cifrados solo se aplican a las MAC PDU que transportan cargas útiles de datos. La subcapa MAC que lleva a cabo estas funciones se denomina subcapa de privacidad.

Las PDU genéricas que ayudan a las estaciones a determinar el alcance, la nomadicidad o el establecimiento de enlaces con otras estaciones base no están encriptadas.

Todo el proceso de intercambio de claves se basa en el mecanismo de criptografía de clave pública-clave privada (Rivest, Shamir y Adleman, RSA) y sigue un modelo cliente-servidor con la estación base actuando como servidor y la estación suscriptora o terminal de usuario actuando como cliente para buscar la clave de autorización. El protocolo de gestión de claves utilizado por los equipos de usuario se denomina protocolo de gestión de claves de privacidad (PKM, Protocol Key Management).

En la Figura 26 se muestra en funcionamiento la gestión de privacidad y claves donde una estación de usuario recibe las MAC PDU de la estación base para el registro inicial que no están encriptadas. Luego, la estación de usuario inicia el proceso PKM enviando un mensaje de petición (PKM-REQ) a la estación base para la autenticación.

El mensaje se cifra utilizando la clave pública de la estación de usuario (que está incluida en el firmware) y lleva un certificado X.509. El certificado ayuda a la estación base a verificar la identidad del usuario junto con la dirección MAC contenida en el mensaje. Los certificados X.509 son únicos y no se pueden falsificar fácilmente.

Después de la autenticación, la estación base envía un mensaje de respuesta (PKM-RSP), que contiene la clave de autorización (AK). El mensaje también contiene los detalles de los servicios autorizados a los que el terminal de usuario puede acceder.

El mensaje se cifra con la clave pública del terminal del usuario, lo que permite a él mismo descifrar el mensaje utilizando su clave privada.

Las claves transmitidas contienen información adicional, como la vida útil de la clave, el número de secuencia de la clave, etc., que se utilizan para actualizar periódicamente las claves y mantener la seguridad contra los piratas informáticos.

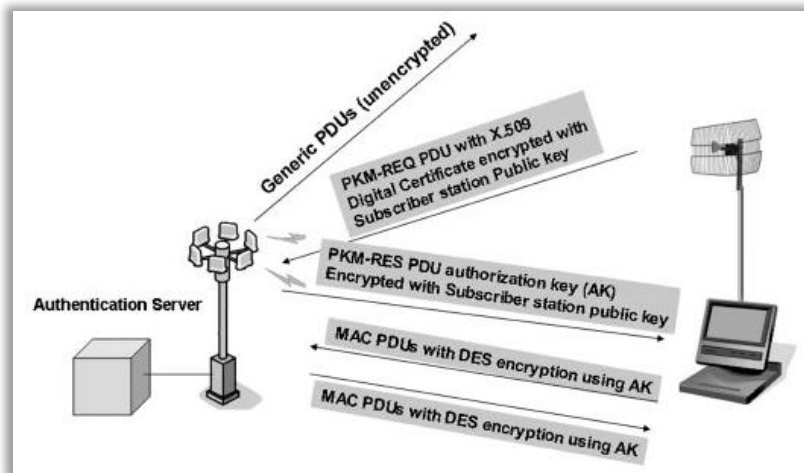


Figura 26. Funcionamiento seguridad WiMAX [24].

Dado que la red WiMAX se basa en el protocolo de Internet, tiene las mismas vulnerabilidades que cualquier red IP, como DoS (denegación de servicio), suplantación de IP, secuestro de sesión, etc. Otros tipos de ataques potenciales para una red WiMAX son el Man in the Middle y la manipulación de la red con tramas de gestión falsificadas (las tramas de gestión no están cifradas).

Aun así, los usuarios de WiMAX pueden sentirse seguros porque sólo los usuarios autorizados pueden acceder a los servicios WiMAX y los datos transmitidos están libres de manipulación.

Sin embargo, la capa física no es del todo segura, por lo que WiMAX es vulnerable a ataques clásicos a nivel físico como:

- **Scrambling:** afecta al orden de tramas específicas donde un atacante puede obligar a los usuarios a retransmitir los datos, por lo que el canal se vuelve muy ocupado afectando al rendimiento general de la red. El impacto puede considerarse bajo, ya que basta con retransmitir los datos para recuperar el estado de la red.
- **Jamming** (interferencias): presencia de una fuente de ruido maliciosa o accidental, que reduce drásticamente el rendimiento de la red y la capacidad del canal de comunicación. Afortunadamente, la interferencia puede detectarse y localizarse fácilmente mediante dispositivos de escaneo de radio, pero los riesgos pueden considerarse importantes.

Es muy probable que se produzca también un ataque de denegación de servicio (DoS) en una red WiMAX porque las operaciones de autenticación (usuarios o dispositivos) necesitan procedimientos largos para ejecutarse, por lo que un atacante puede inundar fácilmente a un usuario enviándole numerosos mensajes para autenticarse. Un escenario potencial podría ser la inundación de una estación para agotar su batería.

4. Simulación diseño del sistema

Una vez descrito y explicado en el apartado anterior las principales características de WiMAX, se lleva a cabo una simulación real del diseño de una red WiMAX que dé cobertura para ofrecer servicios de banda ancha a un emplazamiento rural de Extremadura. En concreto, al municipio Castañar de Ibor.

Los lugares elegidos existen geográficamente pero el servicio que se quiere dar no es un servicio real ni requerido en ninguno de ellos. Se ha ideado como propósito de este trabajo final de máster, de tal manera que permita simular y determinar la capacidad de la solución propuesta.

4.1. Descripción del escenario

La simulación del diseño tiene previsto dotar de cobertura con la tecnología de red WiMAX a diferentes zonas de Castañar de Ibor con el fin de que permita determinar la viabilidad de la solución en todo el municipio.

Se elige Castañar de Ibor por ser un municipio rural donde la implantación de servicios de banda ancha puede ser dificultosa por sus características orográficas principalmente, tiene topográficas difíciles (montañosas) que encarecen la construcción de redes alámbricas, presenta escasez y ausencia de transportes públicos, bajo ingreso per cápita y la cobertura de banda ancha fija alámbrica no llega a todos los emplazamientos del municipio.

Además, sus habitantes demandan servicios de alta capacidad para el desempeño de sus tareas, para poder desarrollar y ampliar sus competencias y economías y para mejorar su calidad de vida.

Temas demandados por la población bajo encuesta informal: teletrabajo, formaciones online, venta electrónica, nuevos recursos turísticos para su visibilidad, entre otros.



Figura 27: Localización municipio.

Castañar de Ibor es un municipio de la provincia de Cáceres, comunidad autónoma de Extremadura, se localiza en el extremo este de la provincia. Cuenta con una superficie de 147,01 Km² que forma parte de la Mancomunidad Integral Villuercas-Ibores y Jara, concretamente de la comarca de Los Ibores, al sur del río Tajo.

Los principales datos de Castañar de Ibor del último año (2022) son:

- **Densidad de población:** 6,97 habitantes por Km²
- **Habitantes:** 1025. De los cuales 499 son mujeres y 526 hombres.
- **Población máxima estacional** (personas que tienen algún tipo de vinculación o relación con el municipio, ya sea porque residen, trabajan, estudian o pasan algún período de tiempo en él): 2500 personas.

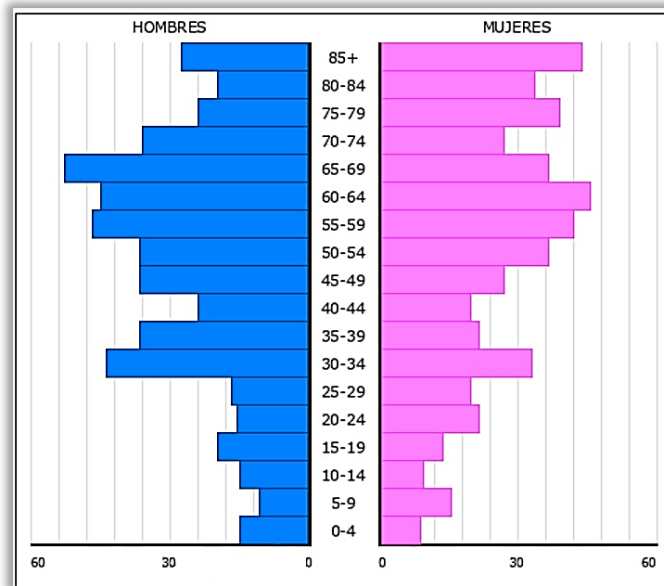


Figura 28: Pirámide de población Castañar de Ibor (2022). [29]

El municipio se encuentra en zona montañosa con un entorno natural con vegetación variada, toda ella propia del bosque mediterráneo. Destacan los olivos y las encinas, así como los castaños. Estas tres especies, combinados con otros restos de flora, forman bosques de gran riqueza paisajística y constituyen el principal motor económico del municipio junto con el turismo.

Su fauna también es variada. Destacan aves rapaces y carroñeras como águilas y buitres negros y leonados. También mamíferos como jabalíes, venados, gamos y muflones.

El clima es mediterráneo, con inviernos suaves y lluviosos, veranos secos y calurosos o templados y con otoños y primaveras variables tanto en temperaturas como en precipitaciones.

En Castañar de Ibor se localiza la cueva más interesante de Extremadura, con finos y bellos espeleotemas, declarada en 1997 como Monumento Natural.

El núcleo urbano presenta una abrupta orografía con fuertes pendientes, lo que no propicia el desarrollo urbanístico. En su lugar, en los últimos años, se están construyendo viviendas en terrenos de la periferia del suelo urbano donde las pendientes son más suaves.



Figura 29: Fotografías Castañar de Ibor.

En la Figura 30 puede verse como ha sido el desarrollo urbanístico de Castañar de Ibor. Cada color del mapa representa una década, excepto el negro que representa todos los edificios anteriores a 1900 (casco histórico).

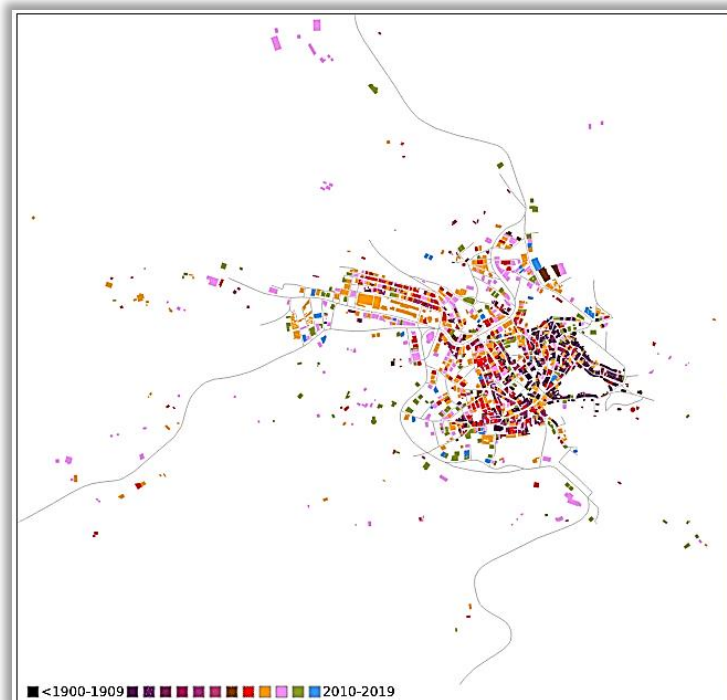


Figura 30: Edificación por década de construcción [30].

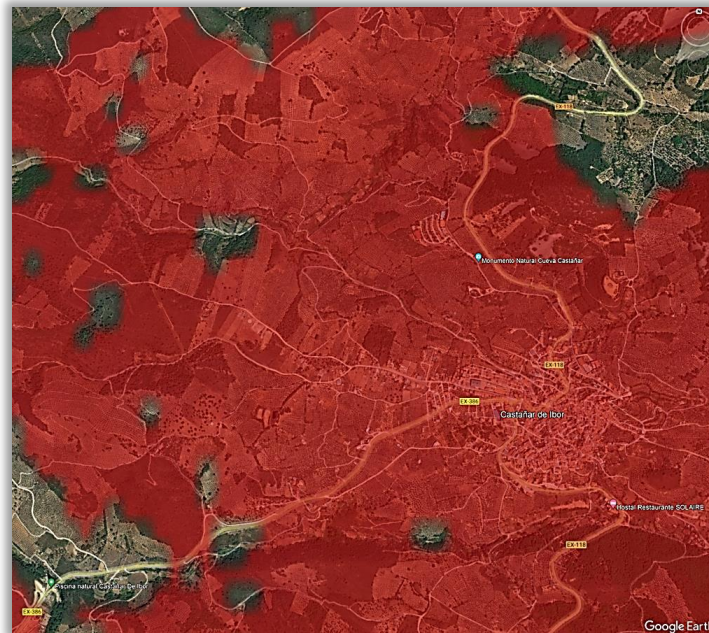


Figura 32: Área de despliegue de la red en sombreado rojo.

La simulación del despliegue previsto podrá ser ampliado a zonas del municipio no contemplados en el inicio, pudiendo llegar hasta 998 unidades inmobiliarias según se indica en el INE a través de sus diferentes publicaciones estadísticas, sobre todo usando como fuente el Padrón Municipal que se actualiza anualmente. También puede ser ampliado a otras unidades inmobiliarias de otros municipios cercanos gracias al gran alcance que WiMAX ofrece.

Para facilitar el diseño, se han tenido en cuenta las estaciones móviles ya existentes en la población [31]. Será útil para nuestro diseño, pudiendo utilizarlos para ubicar nuestros equipos sin necesidad de realizar un nuevo emplazamiento (torre, caseta para equipos, etc.).

No obstante, hay que tener en cuenta que habría que ponerse en contacto con los operadores propietarios para solicitar permiso para poder instalar allí. De no obtener los permisos, sería necesario buscar otra ubicación.

4.2. Topología de la red

Se tiene en cuenta una topología estrella, formada por un nodo central que actúa como nodo intermedio de la red que gestiona el envío y la recepción de los datos y el resto de las estaciones se conectan a este nodo principal.

Es decir, se trata de un enlace punto a multipunto: el punto central se comunica con otros puntos remotos. Generalmente esto implica que la comunicación es solamente entre el punto central y los remotos, y viceversa, y sin existir comunicación entre los remotos.

Por lo tanto, la estación central ofrecerá acceso a la red desde una única ubicación hacia varias ubicaciones (terminales de usuarios o estaciones suscriptoras, CPE), permitiendo usar los mismos recursos de red entre ellos.

El puente ubicado en la estación central se conoce como estación base (BS). Todos los datos que pasan entre las estaciones de usuario deben pasar a través de la estación base.

Este tipo de redes se pueden implementar fácilmente ya que el equipo tiene que instalarse solo en las nuevas estaciones de usuario. La única condición es que todas las estaciones de usuario deben orientarse hacia la estación base.

Concretamos las ubicaciones de los equipos:

- La estación base (BS) se propone situarla en la dirección Calle Occidente, 178P y posición: latitud 39°37'47.07"N; longitud 5°25'29.67"O. Tiene una elevación con respecto al suelo de 662 m. Albergará la conexión a Internet mediante un router y se cableará el firewall, el switch, los servidores y el punto de acceso hasta las antenas de la estación base.
- Las estaciones de usuario se ubicarán en los principales emplazamientos del municipio que se detallan en la siguiente Tabla 4:

NOMBRE	DIRECCIÓN	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN	Distancia a BS
UNICAJA Banco	C. Cuesta de Picasso, 4	39°37'38.88"N	5°24'55.79"O	681 m	950 m
El Chiringuito y Piscina Natural	Av. Robledollano, s/n	39°37'12.05"N	5°26'41.58"O	499 m	2 km
Cooperativa "San Benito Abad"	Av. Extremadura, 23	39°37'48.10"N	5°24'54.33"O	683 m	1,2 km
Camping y Centro de Interpretación de La Cueva	Av. Navalmoral, s/n	39°38'5.73"N	5°25'15.57"O	662 m	1,8 km
Estación de Servicio Castañar	Av. Guadalupe, 0	39°37'30.06"N	5°25'6.58"O	657 m	1 km
Hotel Rural "Las Mozas"	Av. Guadalupe, 10	39°37'43.12"N	5°25'5.97"O	651 m	600 m
Reciclados	C. Occidente, 180P	39°37'54.56"N	5°25'59.21"O	641 m	800 m
Hostal Restaurante "El Solaire"	Av. Guadalupe, 29	39°37'27.84"N	5°24'52.73"O	659 m	1,4 km
Tanatorio "San Benito Abad"	Av. Robledollano, 22	39°37'42.64"N	5°25'22.93"O	631 m	280 m

Tabla 4: Detalle emplazamientos para la cobertura*.

*Algunas localizaciones pueden ser aproximadas.

Se creará una red estrella, ofreciendo así una conexión punto a multipunto donde el nodo central será el ubicado en C/Occidente, 178P que albergará el proveedor de servicios de Internet y dispondrá de antenas sectoriales para enviar la señal WiMAX a los distintos emplazamientos.

Este planteamiento de red queda representado en la Figura 33 y Figura 34:

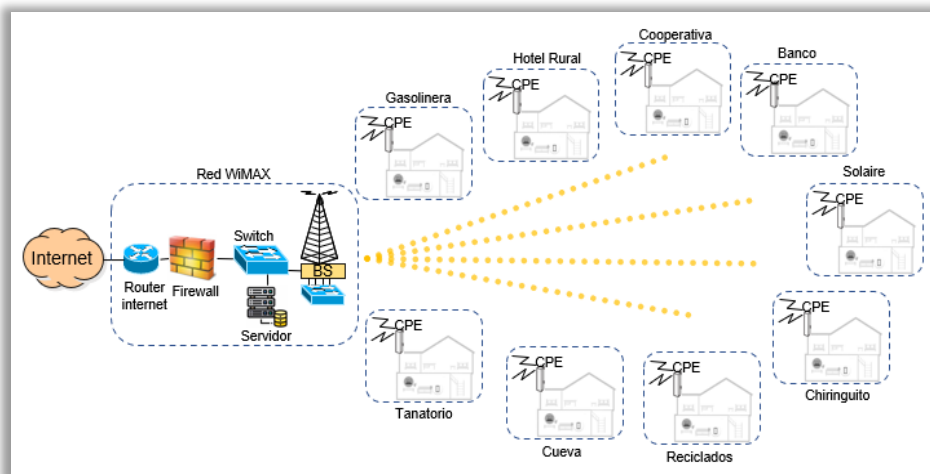


Figura 33: Diagrama de red.

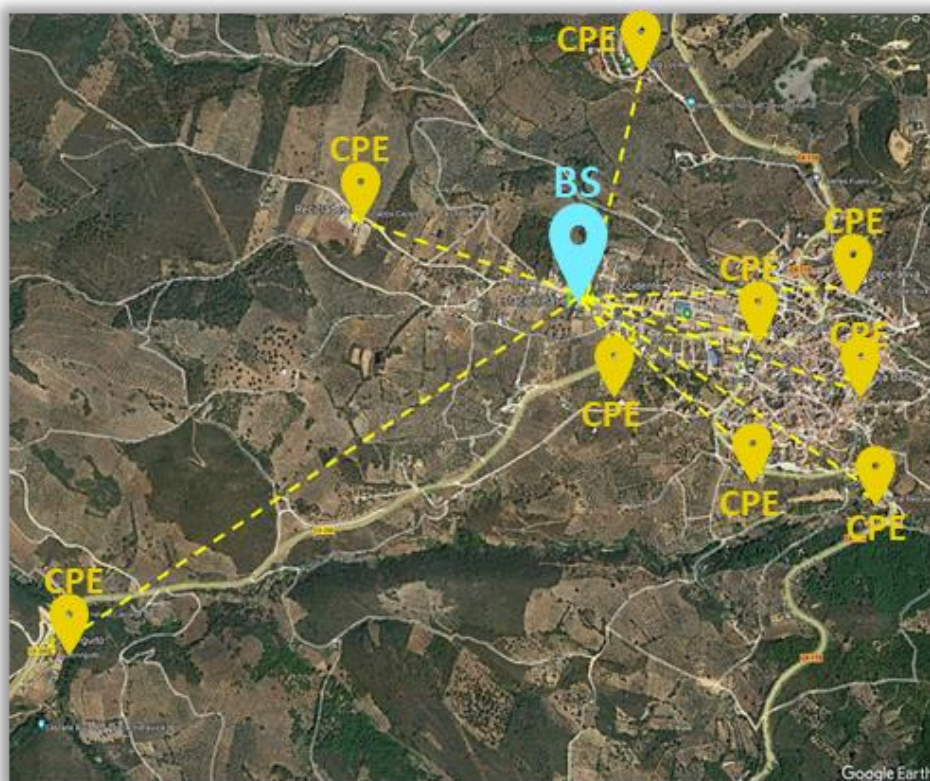


Figura 34: Diagrama de red en Google Earth.

4.3. Elección frecuencia de transmisión

Como se ha especificado en el apartado 3.4.2, WiMAX puede trabajar a diferentes frecuencias donde algunas de ellas requieren una licencia de uso y otras no.

Para determinar la elección de la frecuencia a la que se va a transmitir hacemos una comparativa de ambas opciones.

Espectro con licencia (banda 2,5 GHz a 3,8 GHz):

- Ofrece alta potencia de transmisión ya que no existe limitación de potencia. Esta mayor potencia lleva consigo un incremento en el coste del equipamiento.
- Se opera en Full-Duplex, lo que permite duplicar la capacidad. Este aumento lleva consigo también un incremento del coste debido al uso de duplexores.
- El ancho de banda empleado es de 3,5 MHz y 13,1 Mbps de capacidad máxima a nivel físico. Debido a la escasez de espectro y a la necesidad de reutilización de frecuencias, no es viable mayores anchos de banda.
- Mejor calidad del servicio que el espectro sin licencia.
- Mejor recepción en entornos NLOS (non line of sight - visión no directa entre los puntos) a frecuencias bajas que el espectro sin licencia.
- Alta confiabilidad cuando se trata de problemas de interferencias.

Espectro sin licencia (banda 5,25 GHz a 5,85 GHz):

- Ofrece baja potencia de transmisión ya que está limitada por aspectos regulatorios. Esta menor potencia lleva consigo una reducción en el coste del equipamiento.
- La frecuencia de operación en Europa es de 5475 MHz a 5725 MHz.
- Permite el uso de ancho de banda mayores que el espectro licenciado debido a la gran disponibilidad de espectro (200 MHz). El ancho de banda más empleado es el de 10 MHz, lo que permite una capacidad máxima de 37,7 Mbps a nivel físico.
- Productos del mercado más rápidos.
- El método de duplexación empleado es siempre TDD, lo que requiere repartir el throughput disponible entre el tráfico ascendente y descendente, pero permite establecer una simetría en el tráfico ascendente-descendente que se adapte a la demanda concreta, lo que lleva consigo un mayor aprovechamiento del espectro.
- Costes más bajos puesto que no hay necesidad de pagar para operar con estas bandas a diferencia de las bandas de frecuencia con licencia que requieren pagar un precio para operar y su obtención depende del país en el que se desea operar (ofertas públicas o subastas).
- Más opciones de interoperabilidad.

Las principales diferencias entre ambas bandas radican en la potencia y el espectro disponible. Mayor potencia implica mayor alcance, pero también mayor coste y mayor disponibilidad de espectro implica mayor capacidad.

Por lo tanto, tras la comparativa se opta por trabajar en banda libre a una frecuencia de **5,4 GHz** puesto que ofrece mejores ventajas para este proyecto, ya que los usuarios estarán situados a una corta distancia, lo que supone un mejor rendimiento, así como un ahorro económico, mayor escalabilidad e interoperabilidad, principalmente debido a que no requieren adquirir espectro y sus características son compatibles con lo que necesitamos dotar.

Si los usuarios se situasen a distancias mayores (superiores a 25 Km), sería mejor optar por trabajar con licencia.

4.4. Elección equipos

Para llevar a cabo el diseño será necesario elegir los equipos a utilizar en nuestra red.

Para ello, se han revisado los catálogos de los productos de diferentes fabricantes que actualmente se encuentran en el mercado: Alvarion, Albentia, Aperto, Radwin, tp-link, etc.

A continuación, se detallan los equipos elegidos para cada elemento necesario de la red WiMAX a implementar donde se ha tenido en cuenta para su elección las características del transmisor, receptor, entorno y servicios requeridos.

4.4.1. Estación Base (BS)

La estación base será instalada en un punto elevado de la orografía y con antenas sectoriales para cubrir el área de interés (varios Km²). Hay que tener en cuenta que debe tener visibilidad directa con los equipos de usuario (CPE).

Tiene que gestionar el acceso múltiple simultáneo de varios usuarios, repartiendo el espectro radioeléctrico que tiene asignado entre los usuarios, realizar medidas de la señal que reciben los CPEs y de la interferencia del canal para determinar cuál es la estación base más adecuada para servir a cada CPE concreto y realizar funciones de operación y mantenimiento, tales como gestión de alarmas, cambios de parámetros, actualización de software, etc que debe ser supervisado desde los centros de gestión de red.

El dispositivo elegido para la BS forma parte de la familia ARBA Access de Albentia que está disponible para la banda de 5GHz en redes punto a multipunto. Sus especificaciones pueden verse en el apartado 8. *Anexo*.

Se decide trabajar con la marca Alentia por su gran implantación de éxito en numerosos proyectos de redes WiMAX, así como debido a la claridad en sus especificaciones técnicas y por su gran atención al consultarles dudas por teléfono.



Figura 35. Estación Base Alentia, modelo AXS-BS-453-N.

Para este trabajo se decide contar con una estación base formada por una antena con cuatro sectores de 60 grados para poder cubrir todas las zonas objetivo.

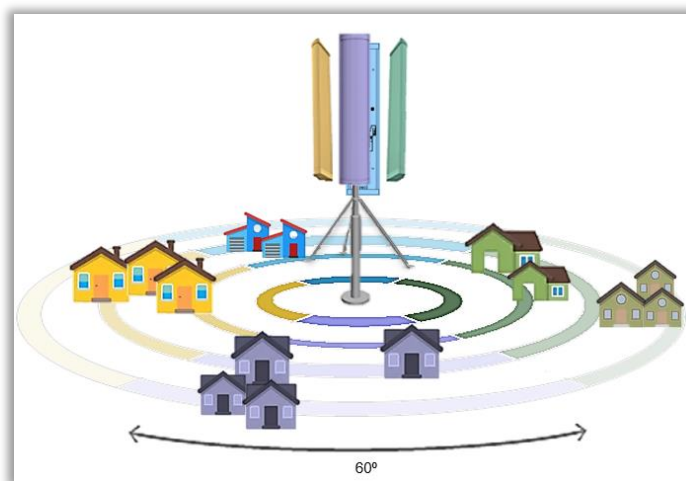


Figura 36: Diagrama de radiación de cuatro antenas de 60°.

El dispositivo elegido para la antena sectorial forma parte de la familia Alentia que está disponible para la banda de 5GHz para cobertura de sector en redes punto a multipunto. Además, ofrece un gran aislamiento frente a señales interferentes. Sus especificaciones pueden verse en el apartado 8. Anexo.

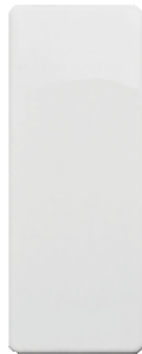


Figura 37: Antena sectorial Albentia, modelo ACC-A60S.

Este sistema radiante será instalado en una torre de comunicaciones o soporte de antenas.

Siguiendo los requerimientos del municipio donde se indica que se evite la proliferación de antenas de telecomunicaciones [32], se decide aprovechar la infraestructura existente de otros operadores y el sistema radiante será soportado por un mástil de celosía que presenta las siguientes características:

- Estructura autoportada vertical.
- Perfiles en celosía.
- Forma prismática cuadrangular
- Altura comprendida normalmente entre 15 y 40 metros.
- Altura modular, lo que permite cambiar la altura sin cambiar la torre.
- Distancia entre patas menor de 2 metros
- Cimentación monobloque.

Además, los soportes de celosía facilitan mucho la instalación y pasos de cables y antenas, ya que al tener la estructura abierta los operarios pueden trabajar cómodamente.

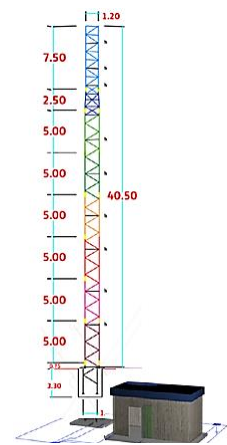


Figura 38: Torre y contenedor de comunicaciones.

Para gestionar y controlar la red se contará con los siguientes equipos auxiliares:

- **Switch**, que servirá para interconectar los diferentes equipos de la estación base.

El dispositivo elegido ofrece funciones de capa 2 y capa 3, lo que permitirá construir una red robusta, escalable y permitirá segmentar, así como administrar el tráfico permitiendo priorizar los enlaces si se necesitan. Dispone de los puertos suficiente para conectar todos los equipos. Las especificaciones de este equipo pueden verse en el apartado 8. *Anexo*.



Figura 39: Switch Netgear, modelo GS110TP.

- **Firewall**, que permitirá controlar la comunicación y proteger la red.

El dispositivo elegido es el denominado DBG-2000 de la familia de D-Link está diseñado con funcionalidades de seguridad robustos, integra un firewall DPI (Deep Packet Inspection) de alto rendimiento y prevención de intrusiones (IPS) que protege contra ataques cibernéticos, incluidos DDoS y otros ataques maliciosos. Además, permite el control de aplicaciones y el filtrado de contenido web, ofreciendo una protección integral de las redes.

Para proteger las conexiones entre sitios distribuidos y teletrabajadores remotos, garantizando que no se manipule ninguna información, el DBG-2000 ofrece una amplia gama de funciones de túneles VPN, tales como IPsec VPN, PPTOP/I2TP y Open VPN. Además, la Quick VPN permite configurar topologías VPN complejas en pocos pasos. A la vez, OmniSSL ofrece funciones como inicio de sesión con SSL y generación de certificados.

Las especificaciones de este equipo pueden verse en el apartado 8. *Anexo*.



Figura 40: Firewall D-Link, modelo DBG-2000.

- **Servidor**, con el que se gestionará y supervisará la red en tiempo real.

El dispositivo elegido forma parte de la familia PowerEdge de Dell y sus especificaciones pueden verse en el apartado 8. *Anexo*.



Figura 41: Servidor Dell, modelo PowerEdge R250.

- **Router**, que interconectarà nostra red a Internet.

El dispositivo elegido forma parte de la familia RB2011 de Mikrotik y sus especificaciones pueden verse en el apartado 8. *Anexo*.



Figura 42: Router Mikrotik, modelo RB2011UiAS-IN.

4.4.2. Terminal de usuario (CPE) o estación suscriptora

El CPE exterior o ODU será instalado en el exterior de un edificio o vivienda (azotea, pared, etc....). El dispositivo elegido para el ODU forma parte de la familia ARBA Access de Alentia que está disponible para la banda de 5GHz en redes punto-multipunto. Sus especificaciones pueden verse en el apartado 8. *Anexo*.

Al igual que para el caso de la estación base, se decide trabajar con la marca Alentia.



Figura 43: Terminal de usuario Alentia, modelo AXS-CPE250-15.

La unidad ya incorpora una antena de 15 dBi de ganancia, por lo que se decide no hacer uso de una antena externa.

La unidad de CPE interior o IDU estará formada por un alimentador PoE (Power over ethernet) y un router que serán instalados en el interior del edificio o vivienda.

El PoE realizará la interconexión de datos y alimentación de energía al respectivo radio (CPE exterior) y a la vez permitirá la comunicación con el router dando los respectivos servicios de Internet.

El dispositivo elegido para el PoE forma parte de tp-link y sus especificaciones pueden verse en el apartado 8. *Anexo*.



Figura 44: PoE tp-link, modelo TL-POE2412G.

El dispositivo elegido para el router se trata de un router Wi-Fi que forma parte también de tp-link. Es necesario un elemento Wi-Fi debido a que los dispositivos principales (portátiles, smartpone, tablets, etc) que consumirán los servicios de banda ancha ofrecidos por nuestra red hacen uso de este tipo conectividad (Wi-Fi). Sus especificaciones pueden verse en el apartado 8. *Anexo*.



Figura 45: Router Wi-Fi tp-link, modelo Archer C80.

Por otro lado, no se ha visto necesario hacer uso de repetidores.

4.5. Simulación de la cobertura

Para realizar la simulación de la cobertura se utiliza el software libre online 'Radio Mobile' desarrollado por Roger Coudé que simula la propagación de ondas de radiofrecuencia.

Radio Mobile permite llevar a cabo diferentes tipos de simulaciones, definiendo para ello las características de las unidades que constituyen los enlaces y haciendo uso de los mapas de elevación. Posee un gran abanico de opciones y características que lo hace muy útil para llevar a cabo este trabajo. Destacan las siguiente:

- Se basa en el modelo de propagación de ondas de Longley-Rice. Se trata de un modelo muy completo ya que considera diferentes modos de propagación en las simulaciones.
- Trabaja en un rango de frecuencias de 20 MHz a 20 GHz.
- Permite una amplia base de datos de mapas de elevación que se pueden combinar con planos de carreteras, topográficos y fotografías de satélite. Además, permite vistas estereoscópicas, en 3D y animaciones en vuelo.
- Presenta gran precisión de los mapas según la fuente escogida.

- Posibilidad de simular diferentes tipos de redes y diversos tipos de simulaciones que permiten plantear diferentes escenarios y topologías de red.
- Posee una gran cantidad de parámetros configurables en los sistemas, tales como potencia transmisora, sensibilidad, tipo de antena, etc.
- Sencillez de uso.

Para llevar a cabo la creación de la red, se comienza introduciendo las coordenadas (latitud y longitud) para que cargue el mapa de elevaciones del terreno del municipio y se combina con imágenes de Google Maps.

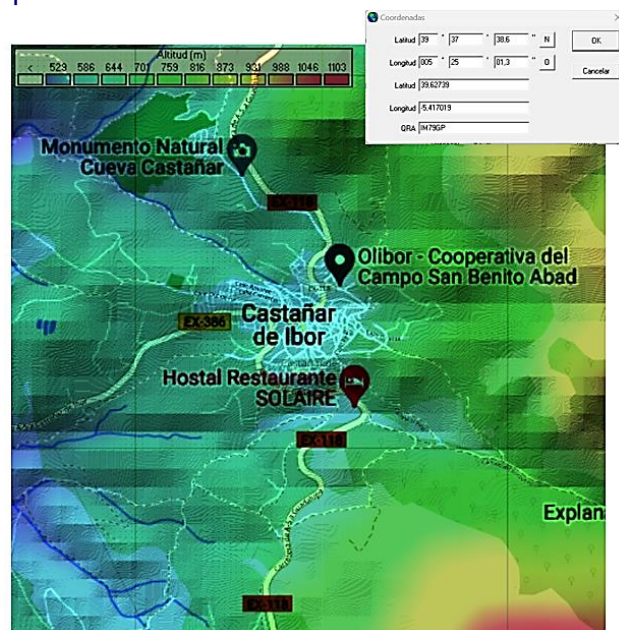


Figura 46: Representación municipio en Radio Mobile.

Sobre este mapa del municipio se puede comenzar a crear la red para llevar a cabo la simulación. Para ello, se va introduciendo las coordenadas (latitud y longitud) de todos los emplazamientos en los que se quiere ofrecer cobertura.

Siguiendo la Tabla 4 se dan de alta las siguientes unidades en el sistema:

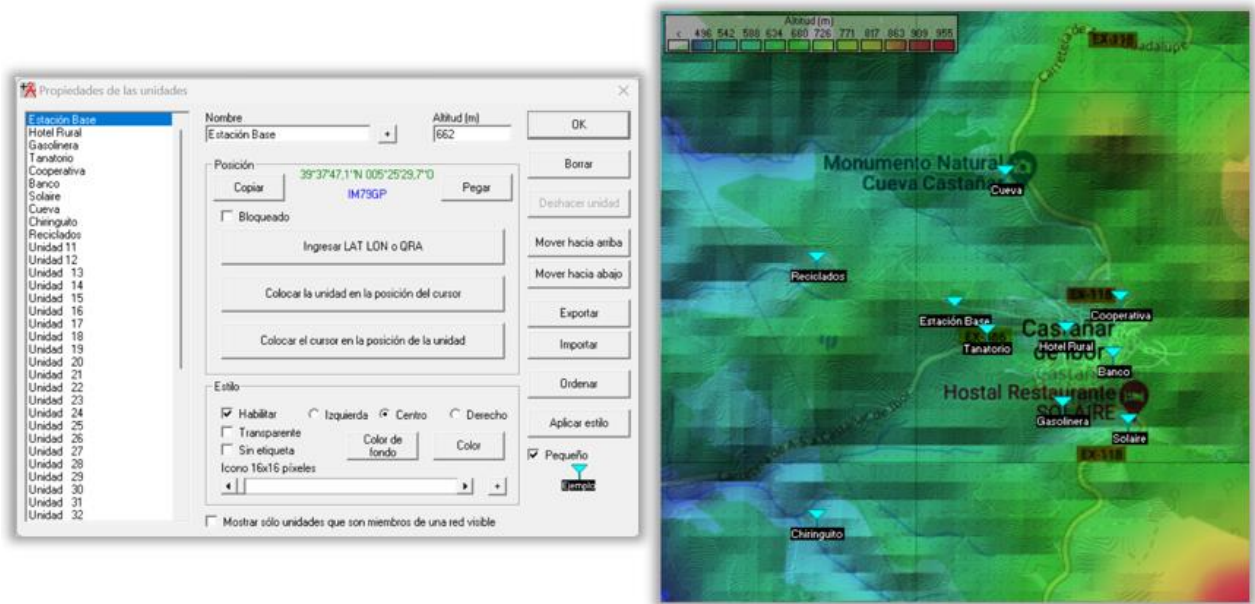


Figura 47: Configuración emplazamientos.

Después, para verificar la cobertura WiMAX, accedemos a las propiedades de la red para configurar todos los elementos:

- Parámetros

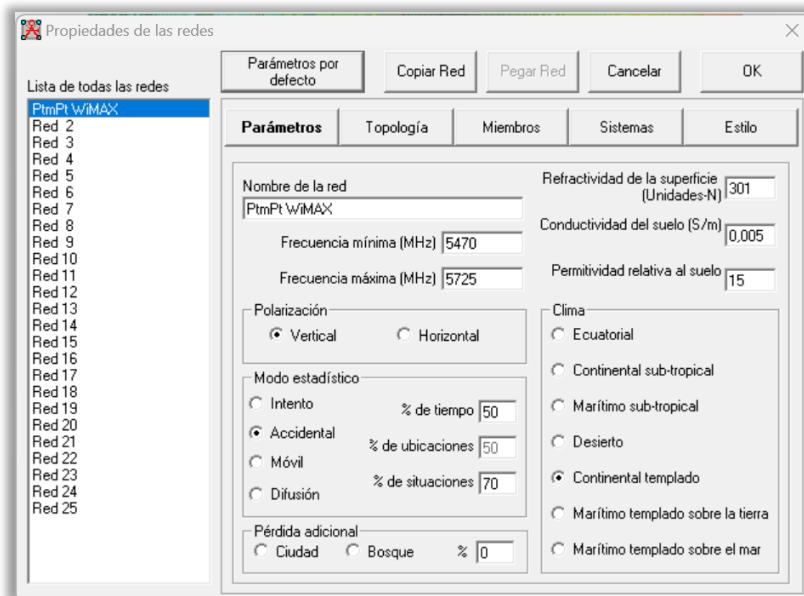


Figura 48: Parámetros red WiMAX.

Dentro de este grupo definimos:

Nombre de la red: PtmPt WiMAX

Frecuencia máxima y mínima de trabajo: 5475-5725 MHz (Europa)

Tipo de polarización: vertical, aunque el modelo Longley-Rice asume ambas que ambas antenas tienen la misma polarización.

Modo estadístico: difusión específica para unidades estacionarias

Tipo de clima de la zona: continental templado

El resto de los parámetros se dejan por defecto ya que no tenemos datos de nuestra zona de reflectividad, conductividad y permitividad.

▪ **Topología:**

La topología será una red de datos en estrella o punto a multipunto donde la unidad maestra se comunica con las unidades esclavo y éstas últimas no se comunican entre sí.

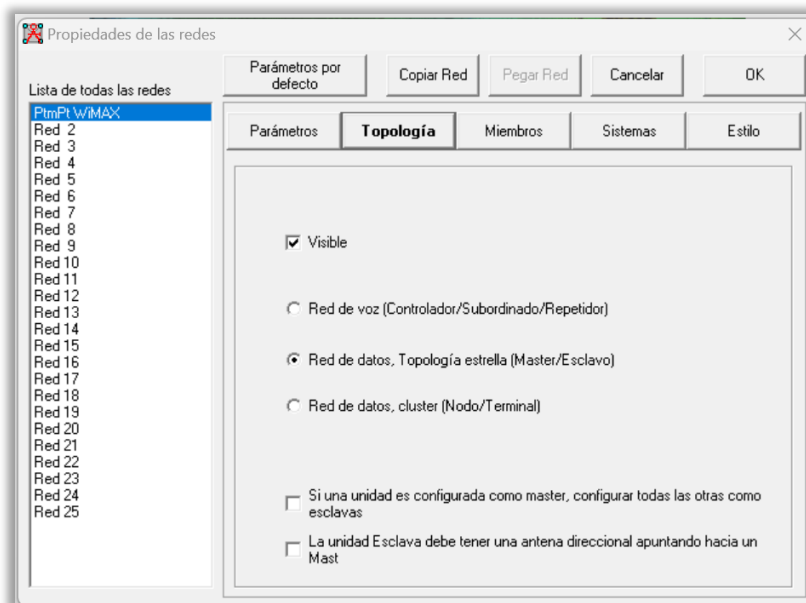


Figura 49: Topología red PtmPT Wimax.

▪ **Sistema:**

Configuraremos nuestros equipos. Es decir, los equipos de la Estación Base (BS) y los de las estaciones de usuario o suscriptoras (CPE).

Con esta arquitectura, de BS y CPEs, donde estos últimos están cerca de los usuarios finales, debemos tener en cuenta el impacto que pueden tener sus radiaciones.

En España, el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) define qué bandas de frecuencia se emplean y qué uso se les da. El espectro disponible en banda libre es muy limitado, además de ser bastante utilizado por el simple hecho de uso libre (no hace falta licencia para transmitir). Esto implica que hay que limitar de alguna manera las transmisiones que, de no ser así, los equipos que emitiesen más potencia interferirían gravemente en todos los demás.

En banda libre, la CNAF establece los siguientes niveles máximos de PIRE (Potencia Radiada Isotrópica Equivalente). Estos niveles de PIRE máximo permitido por Ley, junto con los niveles de distancia máxima de seguridad a la fuente emisora que se recogen en el Real Decreto 1066, definen la distancia de seguridad a la que habría que colocarse respecto de un terminal que esté emitiendo el máximo PIRE permitido.

5,4 GHz	
PIRE Máximo	1 W
Distancia máxima de seguridad	0,09 m

Tabla 5: Niveles máximos para 5,4 GHz.

Esto quiere decir, que situados justo en frente de un CPE que esté transmitiendo datos a la máxima potencia permitida, el Real Decreto 1066 establece que hay que mantener una distancia de seguridad de 9 centímetros.[33]

Por tanto, tenemos en cuenta que la potencia configurada no sobrepase el PIRE definido, en este caso 1W (30 dBm). De sobrepasarse se deben ajustar los equipos de tal forma que:

$$PIRE = Potencia transmitida + ganancia de la antena - pérdidas de línea \leq 30dBm$$

Además de cumplir con la normativa sobre los valores del PIRE, se debe considerar para evitar que en un futuro colapse en el espacio de radiotransmisión para evitar interferencias.

- Configuración Estación Base (BS)

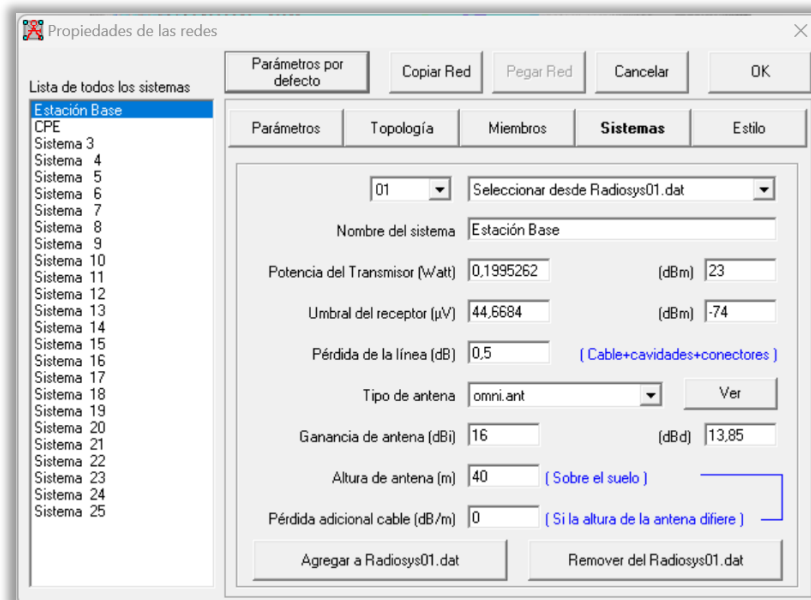


Figura 50: Parámetros sistema Estación Base.

Máxima potencia transmisión (PIRE): 23 dBm.

Ganancia de la antena: 16 dBi

Umbral del receptor: -74 dBm

Tipo de antena: omnidireccional (*omni.ant*).

No se selecciona antena sectorial (*corner.ant*) ya que no es posible indicar en el software las orientaciones exactas de cada antena sector.

Además, con una única antena de este tipo no es posible abarcar todos los emplazamientos que se quieren cubrir.

Por lo tanto, con la simulación *omni.ant*, el alcance de nuestros sectores se puede predecir independientemente de donde esté apuntando.

Altura de la antena: 40 m

Para determinar la mejor altura de la antena para que la señal transmitida llegue a todos los CPEs, hacemos una simulación en la web: HeyWhatsthat (<https://www.heywhatsthat.com/>).

Con esta herramienta se pueden conocer todos los desniveles del terreno y permite realizar un perfil visión del horizonte sobre éste con solo indicar el punto sobre Google Maps y la altura requerida.

De la simulación, se determina como mejor opción una altura de 40 m que sería suficiente para la colocación de las antenas en la Estación Base.

- Configuración Terminales de usuario o estaciones suscriptoras (CPE):

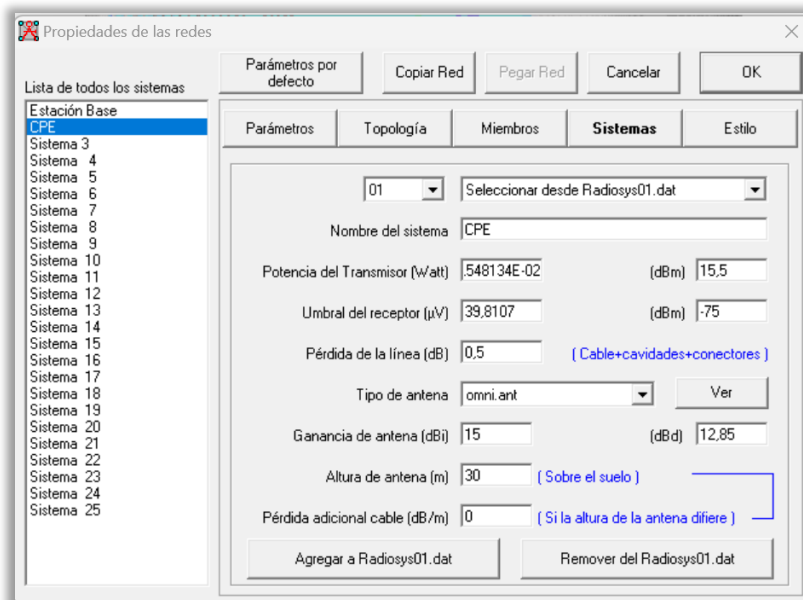


Figura 51: Parámetros sistema CPE.

Máxima potencia transmisión: 15,5 dBm (se ajusta para evitar sobrepasar el PIRE máximo).

Ganancia de la antena: 15 dBi.

Umbral del receptor: -75 dBm.

Tipo de antena: omnidireccional (*omni.ant*). Se decide este tipo siguiendo la misma consideración que para el tipo de antena del sistema Estación Base.

Altura de la antena: entre 5-30 m (se ajusta la mejor altura a cada emplazamiento según cada radioenlace formado).

■ Miembros

Asociamos los equipos con los emplazamientos, definiendo cuál el miembro máster y cuáles son miembros esclavos. Siendo C/Occidente 178P máster y su sistema la Estación Base y todos los demás adquirirán el rol de esclavo y sistema CPE.

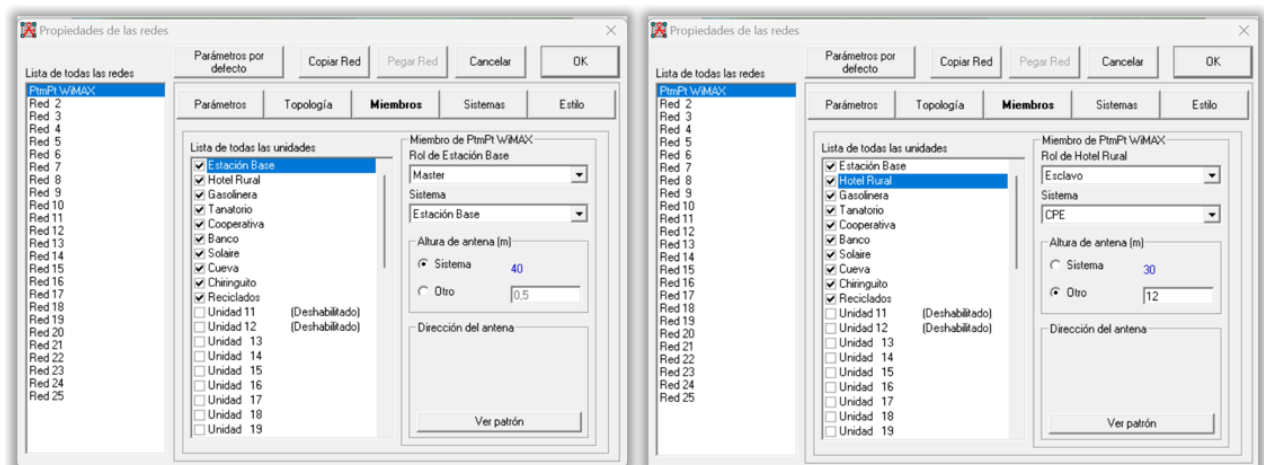


Figura 52: Asignación miembros red PtmPt WiMax.

Una vez configurado todos los elementos, obtenemos los radioenlaces y la cobertura de la Estación Base con los distintos emplazamientos definidos.

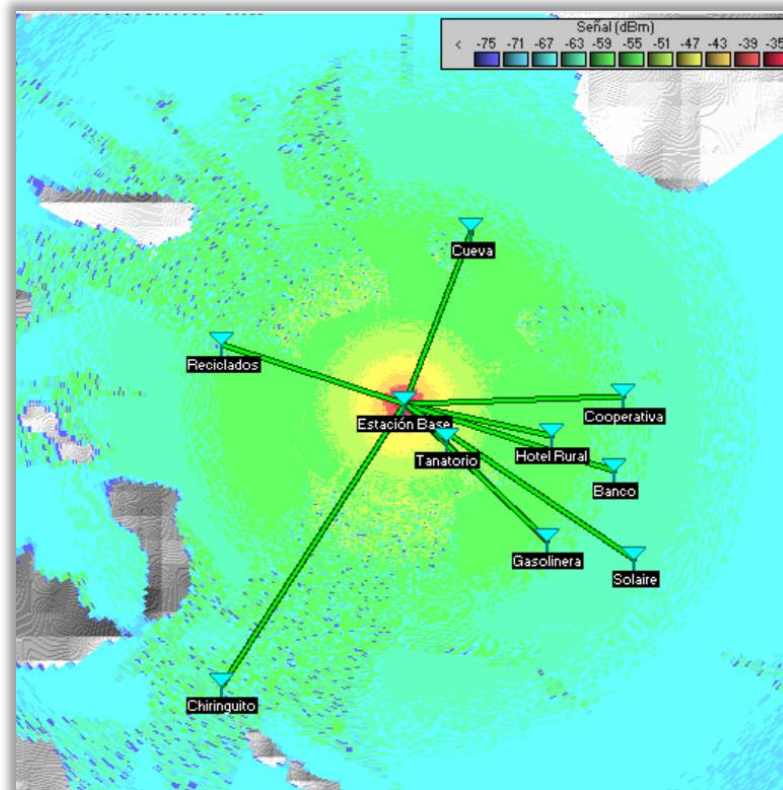


Figura 53: Cobertura de radio polar de red PtMpt WiMAX.

Como vemos en la Figura anterior todos los enlaces están establecidos y dentro de parámetros (por encima de la sensibilidad de los equipos) por lo que podemos dar por buena esta configuración.

A continuación, analizamos en detalle cada uno de los enlaces, donde para una tecnología, frecuencia y servicios deseados, calculamos un balance de enlace, que es la relación que existe entre la potencia disponible en el receptor (estación base en el enlace descendiente o CPE en el ascendente) con la entregada por el transmisor (estación base en el enlace descendente o CPE en el ascendente) a través de las pérdidas y ganancias en el trayecto.

Las pérdidas totales se definen para unas ciertas características del transmisor, receptor, entorno y servicios requeridos como:

$$L \text{ (dB)} = P \text{ Tx} + G - L - \text{Umbral Rx}$$

Donde:

- $P \text{ Tx}$: Potencia transmitida (dBm).
- G : ganancias de señal en su camino de Tx a Rx (dB) por ganancias de antena, de diversidad de recepción o transmisión.
- L : pérdidas de señal en su camino de Tx a Rx (dB) por cableado, interferencia de la misma.
- Umbral Rx: Nivel de señal mínimo a garantizar en la recepción para los servicios requeridos (dBm).

Se calculan las pérdidas para el enlace ascendente y el descendente, y se selecciona las de menor valor por ser las limitantes. El valor calculado (pérdidas máximas de propagación) se usa para definir umbrales de cobertura para cada banda y tecnología: tanto para los equipos de medidas como para las herramientas de simulación de cobertura.

Además, con los modelos de propagación teóricos una vez definidos, la altura del transmisor, el receptor, y la frecuencia, se estima el radio máximo de cobertura teórica a partir de las pérdidas máximas de propagación.

▪ **Enlace Estación Base – Banco**

La distancia existente en este enlace es de 840 m y la altura de la antena del Banco es de 14 m. Se observa buena calidad de señal, S4 en el transmisor y S6 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -58,8 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 111,8 dB, la ganancia del sistema BS a Banco es de 128 dB y la ganancia del sistema Banco a Estación Base es de 119,5 dB.

En la Figura 54 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

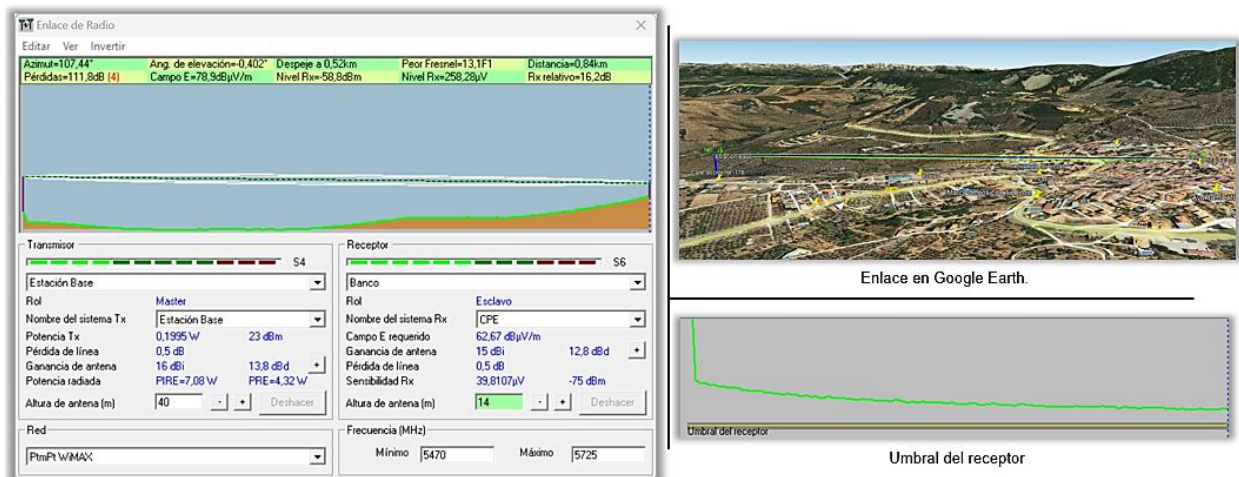


Figura 54: Enlace Radio Estación Base - Banco.

▪ **Enlace Estación Base – Chiringuito**

La distancia existente en este enlace es de 1,29 Km m y la altura de la antena del Chiringuito es de 15 m. Se observa buena calidad de señal, S4 en el transmisor y S7 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -57,3 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 110,3 dB, la ganancia del sistema BS a Banco es de 119,5 dB y la ganancia del sistema Banco a Estación Base es de 128 dB.

En la Figura 55 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

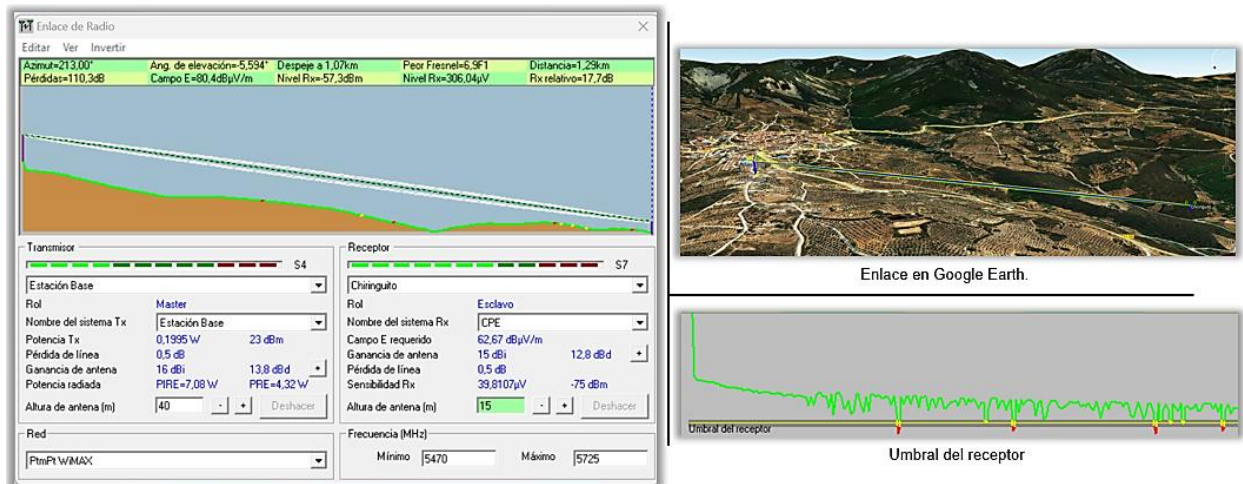


Figura 55: Enlace Radio Estación Base - Chiringuito.

▪ **Enlace Estación Base – Cooperativa**

La distancia existente en este enlace es de 840 m y la altura de la antena del Cooperativa es de 15 m. Se observa buena calidad de señal, S4 en el transmisor y S6 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -58,7 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 111,7 dB, la ganancia del sistema BS a Cooperativa es de 119,5 dB y la ganancia del sistema Cooperativa a Estación Base es de 128 dB.

En la Figura 56 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

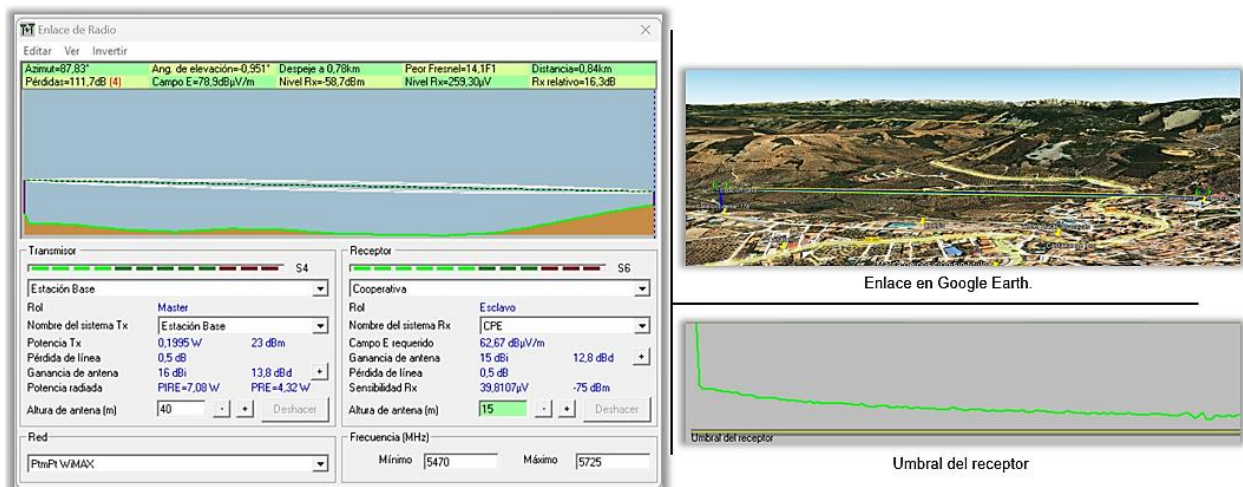


Figura 56: Enlace Radio Estación Base - Cooperativa.

▪ **Enlace Estación Base – Cueva**

La distancia existente en este enlace es de 720 m y la altura de la antena del Cueva es de 22 m. Se observa buena calidad de señal, S5 en el transmisor y S8 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -54,5 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 107,5 dB, la ganancia del sistema BS a Cueva es de 119,5 dB y la ganancia del sistema Cueva a Estación Base es de 128 dB.

En la Figura 57 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

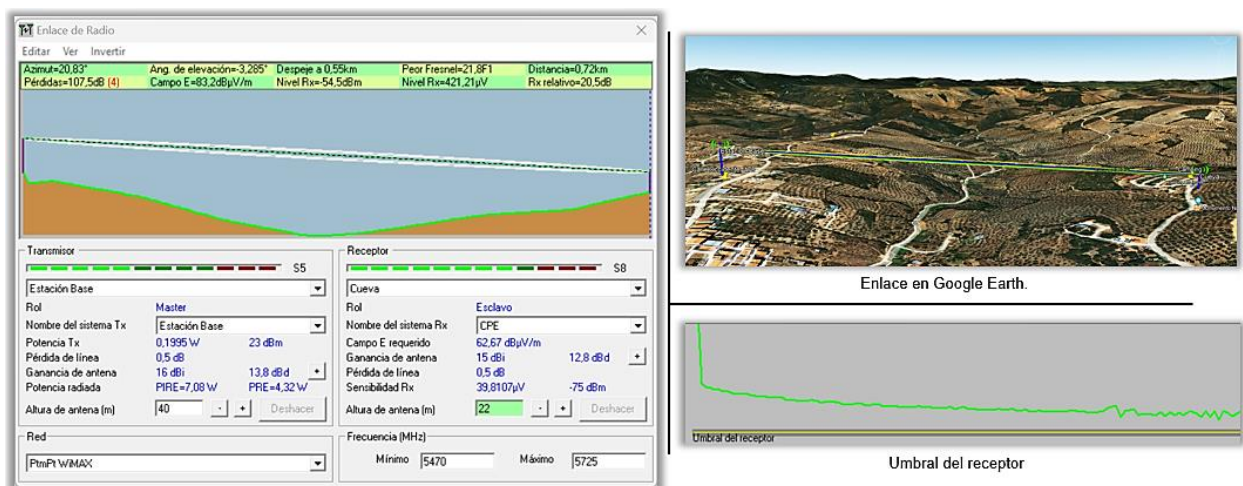


Figura 57: Enlace Radio Estación Base - Cueva.

▪ **Enlace Estación Base – Gasolinera**

La distancia existente en este enlace es de 760 m y la altura de la antena del Ayuntamiento es de 10 m. Se observa buena calidad de señal, S4 en el transmisor y S7 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -58,1 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 111,1 dB, la ganancia del sistema BS a Ayuntamiento es de 119,5 dB y la ganancia del sistema Ayuntamiento a Estación Base es de 128 dB.

En la Figura 58 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

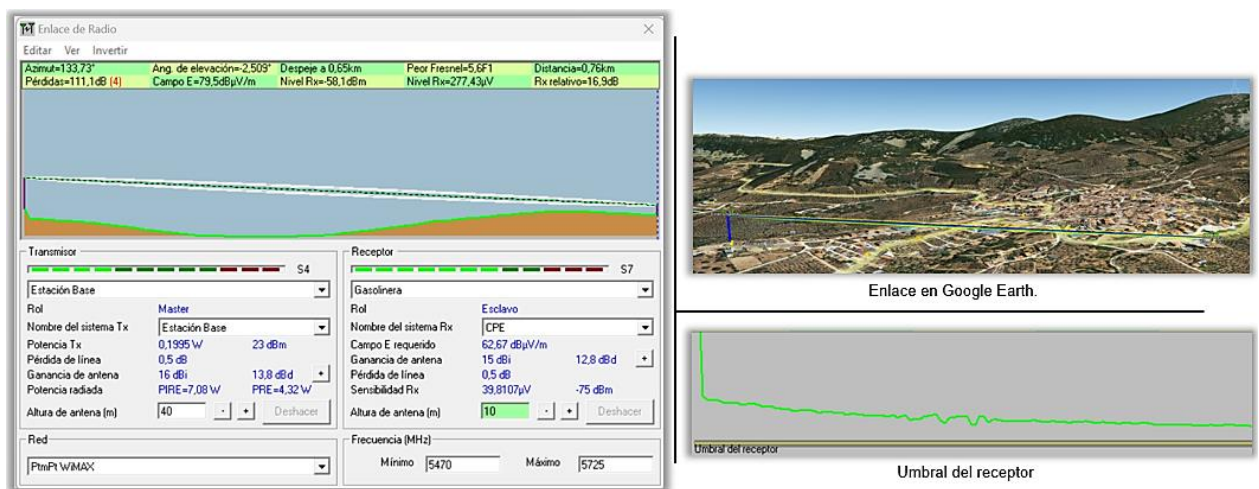


Figura 58: Enlace Radio Estación Base – Gasolinera.

▪ **Enlace Estación Base – Hotel Rural**

La distancia existente en este enlace es de 580 m y la altura de la antena de la Hotel Rural es de 12 m. Se observa buena calidad de señal, S5 en el transmisor y S7 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -55,9 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 108,9 dB, la ganancia del sistema BS a Hotel Rural es de 119,5 dB y la ganancia del sistema Hotel Rural a Estación Base es de 128 dB.

En la Figura 59 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

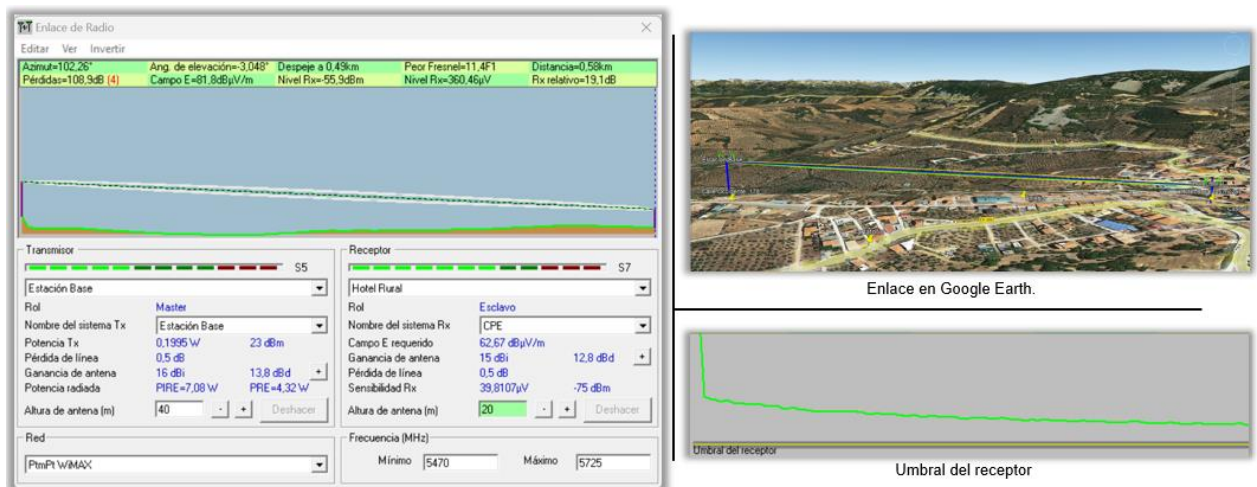


Figura 59: Enlace Radio Estación Base - Hotel Rural.

▪ **Enlace Estación Base – Reciclados**

La distancia existente en este enlace es de 740 m y la altura de la antena de la Reciclados es de 20 m. Se observa buena calidad de señal, S6 en el transmisor y S8 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -52,8 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 105,8 dB, la ganancia del sistema BS a Reciclados es de 119,5 dB y la ganancia del sistema Reciclados a Estación Base es de 128 dB.

En la Figura 60 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

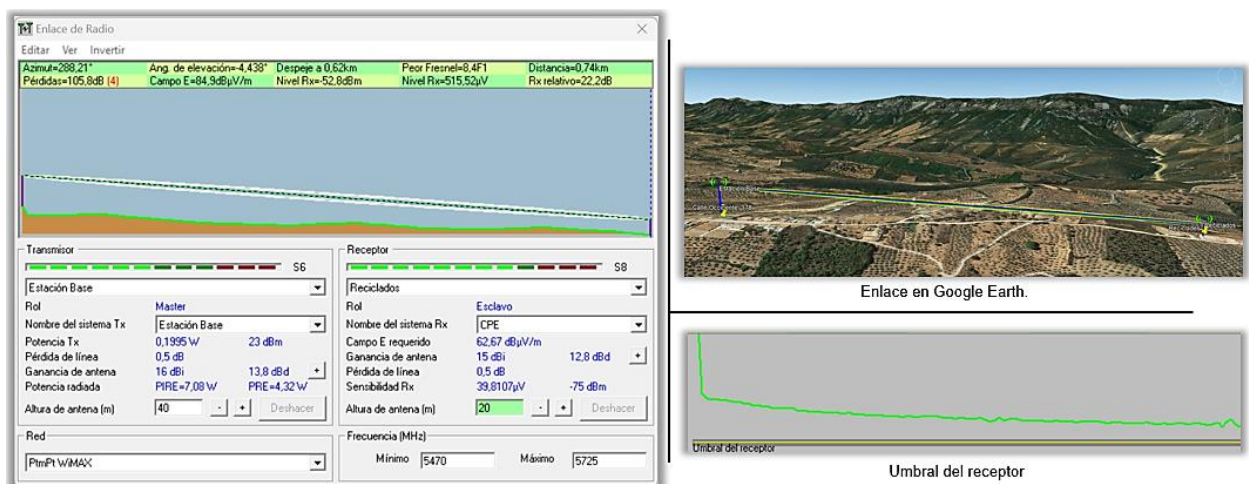


Figura 60: Enlace Radio Estación Base - Reciclados.

▪ **Enlace Estación Base – Solaire**

La distancia existente en este enlace es de 1,06 Km y la altura de la antena de la Solaire es de 26 m. Se observa buena calidad de señal, S3 en el transmisor y S6 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -60,8 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 113,8 dB, la ganancia del sistema BS a Solaire es de 119,5 dB y la ganancia del sistema Solaire a Estación Base es de 128 dB.

En la Figura 61 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

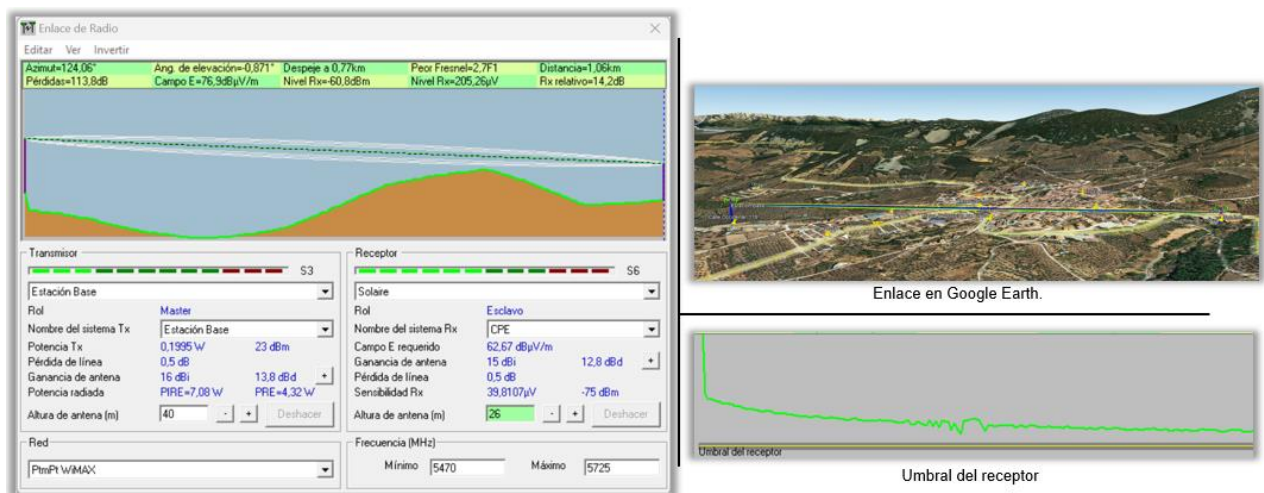


Figura 61: Enlace Radio Estación Base - Solaire.

▪ **Enlace Estación Base – Tanatorio**

La distancia existente en este enlace es de 210 m y la altura de la antena de la Solaire es de 12 m. Se observa buena calidad de señal, S7 en el transmisor y S9 en el receptor con un nivel de recepción, Rx de -48,3 dBm.

Las pérdidas de propagación total son de 101,3 dB y la ganancia del sistema BS a Solaire es de 119,5 dB y la ganancia del sistema Solaire a Estación Base es de 128 dB.

En la Figura 62 se muestra el enlace en Radio Mobile, así como en Google Earth para asegurar que es correcto, ya que el mapa de Google Earth es más preciso que el mapa de Radio Mobile. También se presenta el umbral del receptor.

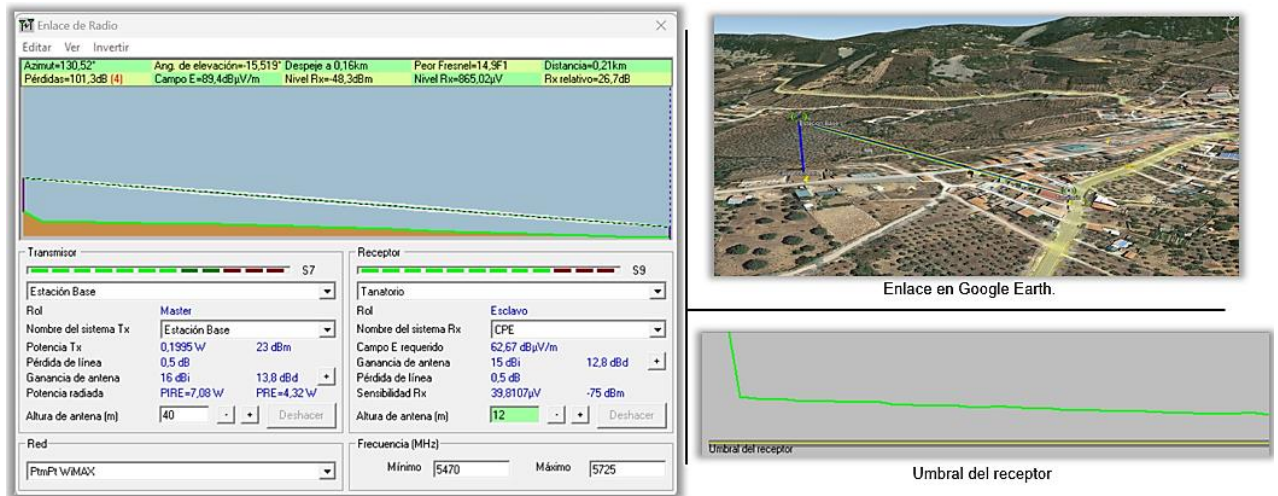


Figura 62: Enlace Radio Estación Base - Tanatorio.

Queda demostrado que podemos ofrecer una señal óptima en todos los emplazamientos.

4.6. Presupuesto

Se realiza un cálculo aproximado del coste de los equipos y de la mano de obra necesaria para la instalación y puesta en marcha de la red con el fin de determinar la viabilidad del proyecto. No se incluye el coste mensual del proveedor de servicios ya que debe ser negociada.

Concepto	Cantidad	Precio	Total
Estación Base AXS-BS-453-N	1	5.500 €	5.500 €
Antena sectoriales 60° ACC-A60S	4	71,99 €	287,96 €
Switch GS110TP	1	152,99 €	152,99 €
Firewall DBG-2000	1	940,32 €	940,32 €
Servidor PowerEdge R250	1	1.695,68 €	1.695,68 €
Router Mikrotik RB2011UiAS-IN	1	119 €	119 €
Terminal Usuario AXS-CPE250-15	9	300 €	2.700 €
PoE TL-POE2412G	9	10,14 €	91,26 €
Router Archer C80	9	41,99 €	377,91 €
Accesorios (conectores, tornillería, herrajes, cables)	1	1.200 €	1.200 €
Mano de obra (2 operarios)	200 horas	30 €	6.000 €
Seguimiento y ejecución del proyecto	1	1.000 €	1.000 €
Total, I.V.A Incluido			20.065 €

Tabla 6: Presupuesto requerido para 9 potenciales usuarios.

* El presupuesto de los accesorios y la mano de obra es aproximado.

Se propone ofertar servicios de conectividad a los usuarios de entornos rurales en un modelo de pago por uso donde se debe gestionar la conectividad, el servicio y la red, así como la comercialización del servicio ofertado, la facturación y la instalación del equipamiento en las unidades inmobiliarias requeridas.

Los equipos de usuario no serán propiedad del cliente, pueden ser instalados en régimen de alquiler y mantenimiento, con garantía del fabricante, de tal manera que, si un usuario se da de baja, pueda reaprovecharse el equipamiento para otro usuario.

Como puede verse en la Tabla 6, el presupuesto no es elevado y, por lo tanto, se considera asumible para ofrecer los servicios.

Igualmente, el proyecto podría ser financiado por una empresa privada o subvencionado por el Estado para que contribuya a reducir costes.

Actualmente, está disponible desde el 01/01/2023 ayudas del Gobierno que permiten la contratación de un servicio asequible de conexión de banda ancha a una capacidad mínima de transmisión de 100 Mbps, principalmente en zonas rurales remotas y la instalación del equipamiento necesario, con una financiación del 100% de los costes de instalación hasta un máximo de 600 euros (programa ÚNICO Demanda Rural), en el marco del plan de recuperación, transformación y resiliencia de la economía española y financiado por la Unión Europea.

Habrá que tener en cuenta el mapa de cobertura definido por el Gobierno, con las zonas elegible/subvencionales y por tanto susceptibles de ser subvencionadas (con alta e instalación equipos WiMAX).

De tal forma que si el cliente se encuentra en zona subvencionable podrá contratar los servicios de conectividad con subvención hasta 600€ (IVA incluido) en concepto de cuota de alta en instalación equipos WiMAX.

Cabe destacar que no se realiza un cálculo económico del retorno de inversión o ROI (Return on Investment) en base a una proyección futura (próximos 5-10 años) debido a que la compensación no será lineal y se considera que las ganancias o beneficios puedan venir también de fuentes subjetivas como es la mejora en la calidad de vida, conquista de nuevos turistas, crecimiento y consolidación del tejido empresarial, incremento de la renta per cápita de la población, incremento de la población activa, al posibilitarse opciones como el teletrabajo, reducción de emisiones de CO₂, etc., que para medirlos habrá que estudiar caso por caso.

5. Conclusiones

Este documento presenta la importancia hoy en día de ofrecer servicios de banda ancha a zonas rurales, remotas, dispersas y de baja densidad de población que aún no disfrutaban de una cobertura adecuada de servicios de banda ancha de alta capacidad para poder desarrollar su día a día: teletrabajar, cursar formaciones online, hacer compras, etc.

Tener una conectividad es esencial para cualquier domicilio como pueda ser la luz o el agua y sus beneficios son muchos: sostenibilidad, flexibilidad, crecimiento industrial, eficiencia de empresas, conciliación laboral y familiar, genera oportunidades y favorece la búsqueda de empleo, conduce a la mejora de las comunidades al reducir la brecha digital y de género, contribuye con la integración social y laboral de las personas con discapacidad, etc.

Conviene subrayar especialmente que las redes de telecomunicaciones han sido la columna vertebral de nuestra sociedad y economía durante la crisis sanitaria generada por el COVID-19. Gracias a la conectividad el alumnado ha podido seguir con sus clases, las empresas se han adaptado rápido al teletrabajo y a las gestiones online, las familias han permanecido conectadas y el ocio digital se han visto reforzado. Hoy en día no hay duda de que las redes de comunicación de alta capacidad son indispensables.

Por tanto, la mejor forma de ayudar al desarrollo de las telecomunicaciones y especialmente en las áreas o zonas que carecen de ella o es de baja calidad, es evaluar y estudiar diferentes alternativas tecnológicas que brinden servicios de banda ancha sostenibles y de bajo coste y determinar la más adecuada para promover su despliegue o implementación.

No existe una tecnología ideal, pero cada una presenta condiciones, que lo hacen más apropiado para una determinada situación geográfica o de acuerdo con el tipo de mercado que se dirige.

Las tecnologías que normalmente utilizan los proveedores de internet son xDSL o Fibra, pero tienen dificultades para acceder a ciertos lugares de la geografía como son las zonas rurales debido a que éstas presentan orográficas complicadas. En estas zonas rurales los despliegues de estas tecnologías son inexistentes o de baja calidad, además, no disponen de ofertas de servicios de banda ancha comparables a lo que contrata la mayoría de la población.

Una alternativa provechosa es la tecnología satelital, sin embargo, el coste del desarrollo de la infraestructura es muy elevado y por lo tanto el coste del servicio a prestar también, lo que no sería una buena opción debido a que la renta per cápita de los municipios rurales es baja.

Por lo cual, se ha considerado la tecnología WIMAX como la que permite las mejores opciones para llegar a lugares de difícil acceso, aporta soluciones muy beneficiosas como proporcionar gran velocidad de transferencia de datos, gran cobertura sin interrupción y sin degradación de la

calidad de servicio requerida de acuerdo al tráfico que circula por la red. Y, en definitiva, permite superar las barreras de los entornos rurales o áreas remotas y dispersas.

Para poder demostrar algunos de estos aspectos, se ha llevado a cabo un diseño de un sistema de comunicación basado en esta tecnología WiMAX donde se ha tenido en cuenta todos los elementos de red necesarios.

Además, se ha definido un escenario real del diseño propuesto en el municipio rural de Castañar de Ibor, Cáceres donde se ha realizado una simulación de cobertura con el software Radio Mobile. Se ha elegido este emplazamiento por sus características orográficas y las necesidades que requieren en cuanto a servicios de conectividad.

La simulación de esta red en este escenario se ha llevado a cabo estableciendo enlaces punto a multipunto e implementado con una serie de equipos WiMAX comerciales disponibles en la banda de 5GHz (la elección de una solución en banda libre elimina los costes de alquiler del espectro licenciado), donde el punto central (BS) se ha ubicado en una zona elevada del municipio formada por 4 sectores de antena para dotar de cobertura a todos los usuarios de forma directa. En la vivienda o edificio de los usuarios se ubica un equipo denominado terminal de usuario o CPE, que lleva una antena integrada. Además, se ha interconectado a la red puntos de acceso Wi-Fi para que los usuarios tengan conectividad y puedan acceder a los servicios de internet. El estudio llevado a cabo destaca las ventajas de la combinación de las dos tecnologías debido a que los dispositivos principales (portátiles, smartphone, tablets, etc) que consumirán los servicios de banda ancha ofrecidos hacen uso de este tipo conectividad.

Los resultados de la simulación han mostrado la capacidad de aplicarse a ambientes reales y se ha comprobado que es una solución técnica y económicamente viable.

Se estima que la red de acceso WMAX tiene un gran potencial para la mejora significativa en costes, rendimiento, fiabilidad y escalabilidad en comparación con los sistemas de redes de acceso de banda ancha existentes para entornos rurales.

6. Trabajos futuros

Los problemas de conectividad en las zonas rurales presentan un gran desafío por lo que desde la perspectiva de futuro sería interesante plantear otros escenarios WiMAX.

También se propone ampliar la red propuesta en este TFM a otros municipios cercanos de Castañar de Ibor para analizar con más detalle otros aspectos importantes que no se han revisado en este trabajo como la calidad del servicio a través de la creación de perfiles de usuarios en la red y definiendo diferentes tipos de flujos de servicios a utilizar (ej.: *Best Effort* que

se trata del tipo de servicio QoS más comúnmente usado en despliegues WiMAX) y así poder determinar también las tasa máximas y mínimas de tráfico sostenido, la latencia máxima, etc.

Con el mismo fin anterior, otra línea de trabajo futura, dada la evolución de las tecnologías móviles, sería realizar una evaluación más detallada de las capacidades del 5G dentro de este ámbito de ruralidad ya que también tiene prometedores beneficios como la alta velocidad de conexión, baja latencia y gran capacidad para conectar dispositivos simultáneamente.

Así mismo, sería muy provechoso realizar una comparativa mostrando las ventajas y desventajas del 5G con respecto a WiMAX puesto que una vez que el 5G esté implementado en todo el territorio y sobre todo en todas las zonas remotas, dispersa y rurales, puede ser un gran competidor de WiMAX.

7. Glosario

España vaciada o vacía: fenómeno que está caracterizado por la pérdida constante de habitantes de pequeñas y medianas ciudades y, medianos y grandes pueblos. Según la Fundéu de la Real Academia Española, la institución sin ánimo de lucro para el buen uso del español en los medios de comunicación, “tanto España vacía como España vaciada son expresiones válidas”.

Servicio universal: conjunto de servicios básicos de comunicaciones electrónicas cuya prestación se garantiza a todos los usuarios que lo soliciten, independientemente de su localización geográfica, con una calidad especificada y a un precio asequible.

Municipio rural: aquel cuya densidad de población es inferior a 100 habitantes por Km².

Brecha digital: diferencia entre los individuos, grupos o territorios que disponen de acceso a Internet y aquellos que no disponen de él.

WiMAX: siglas de Worldwide Interoperability for Microwave Access. Es una tecnología de redes de acceso basada en el estándar 802.16 del IEEE que permite la comunicación inalámbrica a través de ondas electromagnéticas (microondas).

FTTH: siglas de Fiber To The Home. Conocida como fibra hasta la casa o fibra hasta el hogar que se basa en el uso de líneas de fibra óptica para crear una red de banda ancha.

HFC: siglas de Híbrido Fibra Coaxial. Se refiere a una red que incorpora tanto fibra óptica como cable coaxial para crear una red de banda ancha.

VDSL: siglas de Very high-bit-rate Digital Subscriber Line. Conocida como línea de abonado digital de muy alta tasa de transferencia. Se refiere a una red que transmite los impulsos sobre el cable de par trenzado de la línea telefónica convencional para crear una red de banda ancha.

LMDS: siglas de Local Multipoint Distribution Service.

TF: Trabajo Final de Máster.

UMTS (3G): Universal Mobile Telecommunications System o Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles o tercera generación de telefonía móvil.

LTE (4G): Long Term Evolution o cuarta generación de telefonía móvil.

5G: quinta generación de telefonía móvil.

PIB: Producto Interior Bruto.

IEEE: The Institute of Electrical and Electronics Engineers

IMT: International Mobile Telecommunication.

MIMO: siglas de Multiple Input Multiple Output. Se refiere específicamente a la forma como son manejadas las ondas de transmisión y recepción en antenas para dispositivos inalámbricos.

Espeleotemas: es la denominación formal para lo que comúnmente se conoce como “formaciones de las cavidades” y se refiere generalmente a depósitos minerales secundarios formados en cuevas tras la génesis de estas.

ROI: Return on Investment o retorno de inversión.

8. Bibliografía

- [1] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital - Banda Ancha. Disponible en: <https://avancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/Paginas/Index.aspx> (Consultado: marzo 2023)
- [2] Broadband connectivity in the digital economy and society index. (s/f). Shaping Europe's Digital Future. Índice de Economía y Sociedad (DESI), Comisión Europea. Disponible en: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi-connectivity> (Consultado: marzo 2023)
- [3] Informe Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, 30 de junio de 2021. Disponible en: <https://avancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/cobertura/Documents/InformeCoberturaBandaAncha2021.pdf> (Consultado: marzo 2023)
- [4] WiMAX Forum. (s/f). WiMAX Forum. Wimaxforum.org. Disponible en: <https://wimaxforum.org/> (Consultado: marzo 2023)
- [5] Tarazona Lizarraga, C. (2020). Análisis de las necesidades de una Smart City en el marco de un desarrollo sostenible.
- [6] OMS – World Health Organization, junio 2000. Disponible en: <https://www.who.int/es/home> y en https://avancedigital.mineco.gob.es/inspeccion-telecomunicaciones/niveles-exposicion/DocumentacionOMS/2000_OMS_EfectosSaludExposicionCEM_EstacionesyTelefonos.pdf (Consultado: marzo 2023)
- [7] INE - Instituto Nacional de Estadística. Encuesta sobre Equipamiento y Uso de Tecnologías de Información y Comunicación en los Hogares, 2019 y 2020. Disponible en: <https://www.ine.es/uc/LeyYiti5> (Consultado: marzo 2023)
- [8] INE - Instituto Nacional de Estadística. Indicadores demográficos básicos 2020. Disponible en: <https://www.ine.es/dynt3/inebase/index.htm?padre=2077&capsel=2077> (Consultado: marzo 2023)
- [9] GanttProject 3.2 Released on 15 Feb, 2022. Disponible en: <https://www.ganttproject.biz/>
- [10] Upena D Dalal and Y P Kosta. (2009). *WIMAX new developments*. Intech.
- [11] S. Fan, Y. Ge and X. Yu, " Comparison Analysis and Prediction of Modern Wi-Fi Standards, 2022 International Conference on Big Data, Information and Computer Network (BDICN), Sanya, China, 2022, pp. 581-585, doi: 10.1109/BDICN55575.2022.00112.
- [12] Wikipedia contributors. MMDS. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/MMDS> (Consultado: marzo 2023).

- [13] Wikipedia contributors. LMDS. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/LMDS> (Consultado: marzo 2023).
- [14] Material de la UOC del Máster Telecomunicaciones. Disponible en: www.uoc.edu/ (Consultado: marzo 2023).
- [15] O. Kodheli et al., "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 1, pp. 70-109, Firstquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2020.3028247
- [16] Baeza, V. M., & Marban, M. A. (2023). High Altitude Platform Stations Aided Cloud-Computing Solution for Rural-Environment IoT Applications. Computer Networks and Communications, 1(1), 91-104.
- [17] Álvarez Marbán, M. (2022). Sistema de agricultura inteligente para Smart Rural basado en tecnología emergente.
- [18] V. M. Baeza, V. N. Ha, J. Querol and S. Chatzinotas, "Non-coherent massive MIMO integration in satellite communication," 39th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2022), Stresa, Italy, 2022, pp. 200-205, doi: 10.1049/icp.2023.1386.
- [19] WiMAX. Observatorio Tecnológico. Disponible en: <http://recursostic.educacion.es/observatorio/web/es/equipamiento-tecnologico/redes/349-andres-lamelas-torrijos> (Consultado: abril 2023)
- [20] Informes Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España, 2021. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/pac/post-2020/211118-oe8-dafo_tcm30-525632.pdf y en https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/igualdad_genero_y_des_sostenible/diagnostico_igualdad_medioural_2021_tcm30-615197.pdf (Consultado: marzo 2023)
- [21] D. Pareit, B. Lannoo, I. Moerman and P. Demeester, "The History of WiMAX: A Complete Survey of the Evolution in Certification and Standardization for IEEE 802.16 and WiMAX," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 1183-1211, Fourth Quarter 2012, doi: 10.1109/SURV.2011.091511.00129.
- [22] Garhwal, Anita & Bhattacharya, Partha. (2012). *A review on WiMAX Technology*. International Journal of Advances in Computing and Information Technology. 1. 167-173. 10.6088/ijacit.12.10021.
- [23] "IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems," in IEEE Std 802.16-2017 (Revision of IEEE Std 802.16-2012), vol., no., pp.1-2726, 2 March 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8303870.

- [24] Kumar. (2013). *Mobile broadcasting with WiMAX : principles, technology, and applications* / Amitabh Kumar. (1st edition). Focal Press. <https://doi.org/10.4324/9780080878843>
- [25] Ohrtman, F. (2005b). *Wimax Handbook: Building 802.16 Networks*. McGraw-Hill Companies
- [26] Baeza, V. M., & Armada, A. G. (2021, December). User Grouping for Non-Coherent DPSK Massive SIMO with Heterogeneous Propagation Conditions. In 2021 Global Congress on Electrical Engineering (GC-ElecEng) (pp. 26-30). IEEE.
- [27] Baeza, V. M., & Armada, A. G. (2021, June). Orthogonal versus Non-Orthogonal multiplexing in Non-Coherent Massive MIMO Systems based on DPSK. In 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit) (pp. 101-105). IEEE.
- [28] M. Z. Alam, C. C. Patra, C. Patra and M. A. Sobhan, "An Efficient Beamforming Technique in WiMAX," 2009 Fifth Advanced International Conference on Telecommunications, Venice/Mestre, Italy, 2009, pp. 351-356, doi: 10.1109/AICT.2009.66.
- [29] INE - Instituto Nacional de Estadística. Disponible en: www.epdata.es y Habitantes Castañar de Ibor 1900-2022. Disponible en: <https://www.foro-ciudad.com/caceres/castanar-de-ibor/habitantes.html#EvolucionGrafico> (Consultado: abril 2023)
- [30] Sede Electrónica del Catastro. Disponible en: <https://www.sedecatastro.gob.es/> (Consultado: abril 2023)
- [31] Estaciones base (BTS) de telefonía móvil. Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. Disponible en: <https://geoportal.minetur.gob.es/VCTEL/vcne.do> (Consultado: abril 2023)
- [32] Junta de Extremadura. Acuerdo de 28 de julio de 2022, de la Comisión de Urbanismo y Ordenación del Territorio de Extremadura, de aprobación del Plan General Municipal "Simplificado" de Castañar de Ibor. Disponible en: <https://doe.juntaex.es/pdfs/doe/2022/1920o/22AC0076.pdf> (Consultado: abril 2023)
- [33] Real decreto, Emisiones Radioeléctricas. Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social. Disponible en: <https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/medioAmbiente/emisionesradioelectr/icas.htm> (Consultado: abril 2023)
- [34] Garhwal, Anita & Bhattacharya, Partha. (2012). *A review on WiMAX Technology*. International Journal of Advances in Computing and Information Technology. 1. 167-173. 10.6088/ijacit.12.10021.

[35] Rural Broadband - time for 'Business unusual', ITU Telecom World. Disponible en: <https://digital-world.itu.int/rural-broadband-time-for-business-unusual/> (Consultado: abril 2023)

9. Anexos

- Estación Base:

MODELO BS	PARÁMETRO	VALOR PARÁMETRO
 <p>AXS-BS-453-N</p>	Fabricante	Albentia
	Banda de trabajo	4900-5875MHz + 3300-3900MHz
	Calidad neta agregada	70Mbps + 70Mbps
	Ancho canal	10 / 7 / 5 / 3.5 / 1.75 MHz
	Sensibilidad máx. modulación	-74 dBm @ 10MHz -82 dBm @ 1.75MHz
	Max. Potencia TX	23 dBm por canal / 29 dBm total
	Consumo de potencia	< 30 W
	Antena	4 conectores N para antena externa
	Máximo nº CPEs	ilimitado
	Interfaz	Ethernet 10/100
	Estándar	AerDOCSIS compatible con IEEE 802.16-2017

Tabla 7: Parámetros Estación base Albentia, modelo AXS-BS-453-N.

- Antena sectorial:

MODELO ANTENA SECTORIAL	PARÁMETRO	VALOR PARÁMETRO
 <p>ACC-A60S</p>	Fabricante	Albentia
	Frecuencia	4900-5875MHz
	Apertura	60°H - 11°V
	Rango de Frecuencia	5.10 - 5.85 GHz
	Ganancia	16.5dBi ± 0.5dB
	Polarización	Vertical
	Impedancia	50Ω
	Potencia de entrada	6W (máx.)

Tabla 8: Parámetros antena sectorial Albentia, modelo ACC-A60S.

▪ **Switch:**


MODELO Switch	PARÁMETRO	VALOR PARÁMETRO
 <p>GS110TP</p>	Fabricante	Netgear
	Puertos	8 puertos Gigabit PoE+ Ethernet Smart Managed Pro con 2 puertos SFP
	Adaptador de corriente	54 V, 1.25 A, con cable de alimentación
	CPU	500MHz single core, 128MB RAM, 32MB SPI FLASH
	Número VLANs	64
	Configuración	Software de gestión con interfaz de usuario
	Administración	En la nube

Tabla 9: Parámetros Switch Netgear, modelo GS110TP.

▪ **Firewall:**


MODELO Firewall	PARÁMETRO	VALOR PARÁMETRO
 <p>DBG-2000</p>	Fabricante	D-Link
	Puertos	4 puertos Gigabit Ethernet dinámicos y configurables LAN, WAN y DMZ
	Protección	Protección eficiente contra intrusiones, (<i>Intrusion Prevention System, IPS</i>), seguridad avanzada contra ataques DDoS, intrusiones y ataques maliciosos
	Throughput	1.8 Gbps
	VPN throughput (3DES)	450 Mbps
	VPN SSL	200 Mbps

Tabla 10: Parámetros Firewall D-Link, modelo DBG-2000.

▪ **Router:**

MODELO Router	PARÁMETRO	VALOR PARÁMETRO
 <p>RB2011UiAS-IN</p>	Fabricante	Mikrotik
	Puertos	5 puertos 10/100/1000 Ethernet ports
	Adaptador de corriente	54 V, 1.25 A, con cable de alimentación
	CPU	600 MHz
	PoE	Sí

Tabla 11: Parámetros Router Mikrotik, modelo RB2011UiAS-IN.

▪ **Terminal de usuario (CPE) o estación suscriptor:**

MODELO CPE	PARÁMETRO	VALOR PARÁMETRO
	Fabricante	Albentia
	Banda de trabajo	4900-5875MHz
	Calidad neta agregada	70Mbps DL / 35Mbps UL
	Ancho canal	10 / 7 / 5 / 3.5 / 1.75 MHz
	Sensibilidad máx. modulación	-75dBm @ 10MHz -81dBm @ 1.75MHz
	Max. Potencia TX	23 dBm
	Consumo de potencia	< 7 W
	Antena	Integrada de 15dBi o conector RP-SMA
	Interfaz	Ethernet 10/100 Base T
	Adaptador PoE (no incluido)	PoE pasivo 24 VDC
	Estándar	aerDOCSIS compatible con IEEE 802.16-2017

Tabla 12: Parámetros AXS-CPE250-15.

▪ **PoE:**

MODELO PoE	PARÁMETRO	VALOR PARÁMETRO
	Fabricante	tp-link
	Descripción	Soporte PoE Pasivo 24V
	Diseño	Montaje en pared
	Puertos	1x Gigabit RJ45 LAN Port 1x Gigabit RJ45 PoE Port (Pasivo PoE)
	Potencia	Input: 100–240 V 0.4 A Output: 24 V 0.5 A
	Plug and Play	Sí, sin necesidad de configuración
	Temperatura	0–40 °C (32–104 °F)

Tabla 13: Parámetros TL-POE2412G.

▪ **Router Wi-Fi:**

MODELO Router	PARÁMETRO	VALOR PARÁMETRO
	Fabricante	tp-link
	Banda de frecuencia	2.4 GHz and 5 GHz
	Potencia de TX	CE:<23dBm (5.15 GHz~5.25 GHz) FCC:<30dBm (2.4 GHz & 5 GHz)
	Velocidad	1300Mbps a 5GHz + 600Mbps a 2,4GHz
	Antenas	4 antenas fijas omnidireccionales (tecnología MIMO)
	Puertos	1x 10/100/1000 Mbps WAN Port, 4x10/100/1000 Mbps LAN Port
	Estándar	IEEE 802.11 ac/n/a 5 GHz, IEEE 802.11 n/b/g 2.4 GHz

Tabla 14: Parámetros Archer C80.