



Diseño de una Red Inalámbrica de Banda Ancha para un Entorno Rural

Antonio González Calvo

Grado de Tecnologías de Telecomunicación (Telemática)
Integración de redes telemáticas

Consultor: José López Vicario

Profesor Responsable: Pere Tuset Peiró

10 de junio de 2018



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

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Descripción del trabajo</i>
Nombre del autor:	<i>Antonio González Calvo</i>
Nombre del consultor/a:	<i>José López Vicario</i>
Nombre del PRA:	<i>Pere Tuset Peiró</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	06/2018
Titulación:	<i>Grado de Tecnologías de Telecomunicación (Telemática)</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Integración de redes telemáticas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español</i>
Palabras clave	<i>Wi-Fi, WiMAX, malla</i>

Resumen

En el presente documento se analiza cómo implementar una red de comunicaciones basada en tecnologías inalámbricas que permitan ofrecer una cobertura WiFi total en el municipio de Valdeavellano, pequeño pueblo de la provincia de Guadalajara.

En concreto, se hace mención a la tecnología inalámbrica WiMAX, que será utilizada para dotar al municipio de un acceso de banda ancha a Internet, así como de la solución WiFi a implementar en cada zona donde se quiere dar cobertura.

Tras realizar el estudio previo de las tecnologías se define el escenario real. Se trata de un municipio rural en el que sería muy costoso económicamente llevar cableado. Basado en el análisis de requerimientos de la red y al estudio de las diferentes tecnologías se analiza el territorio y se define la solución para la implementación de la red y su viabilidad.

Abstract

This document analyzes how to implement a communications network making use of wireless technologies that allow offering a total WiFi coverage in the municipality of Valdeavellano, a small town in the province of Guadalajara.

Specifically, mention is made about WiMAX wireless technology, which will be used to provide the municipality with a broadband Internet access, as well as the Wi-Fi solution to be implemented in each area where coverage is to be provided.

After realizing a previous study of the technologies, the real scenario is defined. It is a rural municipality in which it would be very costly to economically carry wiring. Based on the analysis of network requirements and the study of different technologies, the territory is analyzed and the solution for the implementation of the network is defined, as well as its viability.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Justificación del Trabajo	1
1.2 Definición de la necesidad.....	1
1.3 Objetivos	2
1.4 Resultados potenciales	2
1.5 Enfoque y metodología.....	4
1.6 Planificación	4
1.6.1 Fases	4
1.6.2 Diagrama de Gantt.....	4
1.7 Resumen	6
2. Estado del Arte.....	7
2.1. Introducción.....	7
2.2 Clasificación de las redes inalámbricas.....	7
2.3. Wi-Fi. IEEE 802.11	8
2.3.1 Introducción	8
2.3.2 ¿Cómo funciona Wi-Fi?.....	8
2.3.3 Arquitectura.....	9
2.3.3.1 Capa Física (PHY).....	11
2.3.3.1.1 Physical Layer Convergence Procedure (PLCP).....	11
2.3.3.1.2 Physical Medium Dependent (PMD).....	12
2.3.3.2 Capa de acceso al medio (MAC)	14
2.3.3.3 Componentes	16
2.3.3.4 Servicios	18
2.3.3.5 Modos de configuración.....	18
2.3.4 Marco legal y regulación del espectro.....	18
2.3.4.1 Legislación vigente	19
2.3.4.2 Regulación del espectro	20
2.3.5 Estándares.....	23
2.4. WiMAX. IEEE 802.16	25
2.4.1. Introducción	25
2.4.2. Componentes.....	26
2.4.2. Estándares.....	27
2.4.2.1 Estándar 802.16-2004	28
2.4.3 Topologías en WiMAX	29
2.4.3.1 Punto a Punto	29
2.4.3.2 Punto a Multipunto.....	30
2.4.3.3 Mallada	30
2.4. Otras tecnologías	30
2.4.1 Satélite.....	31
2.4.2 3G/4G	31
2.5. Casos de éxito.....	32
2.6. Elección de tecnologías a implementar	33
3. Caso de estudio	35
3.1. Análisis de requisitos.....	35
3.2. Descripción del proyecto	35

3.3. Estudio de viabilidad.....	36
3.4. Estudio del radio enlace WiMAX	38
3.4.1 Atenuación y Potencia recibida.....	38
3.4.2 Distancia de seguridad	39
3.4.3 Simulación del enlace punto a punto	40
3.4.4 Equipamiento	44
3.4.4.1 BS y CPE.....	44
3.4.4.2 Antena	44
3.4.4.3 Mástiles.....	44
3.5. Estudio de la red Wi-Fi de interior	45
3.5.1 Atenuación, Potencia y Distancia de seguridad.....	46
3.5.2 Simulación de la red	48
3.5.3 Equipamiento	52
3.6. Estudio de la red Wi-Fi mallada de exterior.....	53
3.6.1 Simulación de la red	54
3.6.2 Equipamiento.....	59
3.7. Arquitectura de red.....	60
3.7.1. Red troncal enlace PtP	61
3.7.2. Red troncal Ethernet	62
3.7.2. Red de acceso Wi-Fi.....	62
3.8. Resumen	63
4. Valoración económica	64
5. Conclusión.....	65
6. Glosario	66
7. Bibliografía	68
8. Anexos	70
8.1. Anexo I. Equipamiento WiMAX	70
8.1.1 Antena.....	70
8.1.2 Estación base	72
8.2. Anexo II. Equipamiento Wi-Fi	74
8.2.1 Wi-Fi de Interior	74
8.2.2 Wi-Fi de Exterior	78

Lista de figuras

Figura 1.1: Valdeavellano.....	1
Figura 1.2: Planificación del Proyecto	4
Figura 1.3: Planificación para PAC1.....	5
Figura 1.4: Planificación para PAC2.....	5
Figura 1.5: Planificación para PAC3.....	5
Figura 1.6: Planificación entrega TFG.....	5
Figura 2.1: Comparativa de las capas de protocolos IEEE 802 con el modelo OSI	9
Figura 2.2: Protocolos en contexto.....	11
Figura 2.3: Trama PLCP	12
Figura 2.4: IBSS	17
Figura 2.5: Conjunto de Servicios Básicos (BSS)	17
Figura 2.6: Conjunto de Servicios Extendidos (EBSS).....	17
Figura 2.7: Canales en banda 2.4 GHz	21
Figura 2.8: Canales no interferibles y anchos de banda en 2.4 GHz	21
Figura 2.9: Componentes en red WiMAX.....	26
Figura 2.10: Resumen de características de los principales estándares IEEE 802.16	27
Figura 2.11: Topología WiMAX fijo.....	29
Figura 2.12: Topología Punto a Punto.....	29
Figura 2.13: Topología Punto a Multipunto	30
Figura 2.14: Topología de Red Mallada (Mesh Network)	30
Figura 2.15: Conexión a Internet vía Satélite	31
Figura 2.16: Cobertura Movistar 3G	34
Figura 2.17: Cobertura Movistar 4G (a) / 4G+ (b)	34
Figura 3.1: Censo en Valdeavellano	36
Figura 3.2: Tráfico generado por Gmail y navegación web	37
Figura 3.3: Tráfico generado por visualización de vídeo a 360p en Youtube... 37	
Figura 3.4: Ubicación puntos radio enlace en Google Earth	41
Figura 3.5: Creación unidad Valdeluz en Radio Mobile.....	41
Figura 3.6: Creación unidad Valdeavellano en Radio Mobile.....	41
Figura 3.7: Diagrama de radiación. (a) HG4958DP-34D (b) Yagi de Radio Mobile.....	42
Figura 3.8: Radioenlace entre Valdeavellano y Valdeluz	42
Figura 3.9: Perfil del enlace PtP Valdeavellano-Valdeluz.....	43
Figura 3.10: Mástil telescópico MBMT-8R.....	45
Figura 3.11: Mástil Iberti de 25m (a) y base (b).....	45
Figura 3.12: Plano del Ayuntamiento	46
Figura 3.13: RSSI Heat Map	49
Figura 3.14: SNR Heat Map	50
Figura 3.15: Channel Heat Map	51
Figura 3.16: Cisco Aironet 1815i Access Point.....	52
Figura 3.17: Ubicación de APs con Google Earth	55
Figura 3.18: Simulación de enlaces en estrella con Radio Mobile	55
Figura 3.19: 2.4GHz RSSI Heat Map	56
Figura 3.20: 5 GHz RSSI Heat Map	56
Figura 3.21: 2.4GHz SNR Heat Map	56

Figura 3.22: 5 GHz SNR Heat Map	57
Figura 3.23: 2.4 GHz Channel Heat Map	57
Figura 3.24: 5Ghz Channel Heat Map.....	57
Figura 3.25: 2.4 GHz Data Rates Heat Map.....	58
Figura 3.26: 5 GHz Data Rates Heat Map.....	58
Figura 3.27: Cisco Aironet 1542D Access Point.....	59
Figura 3.28: Arquitectura de red.....	60

Lista de tablas

Tabla 2.1: Clasificación por alcance de las principales tecnologías inalámbricas	8
Tabla 2.2: Modulaciones en principales estándares 802.11	13
Tabla 2.3: Modulaciones OFDM.....	13
Tabla 2.4: Servicios IEEE 802.11.....	18
Tabla 2.5: Restricciones básica para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz)	20
Tabla 2.6: Canales y frecuencias en banda de 2.4GHz	21
Tabla 2.7: Canales y frecuencias en banda de 5 GHz.....	23
Tabla 2.8: Principales estándares y evolutivos de 802.11.....	25
Tabla 2.9: Resumen estándares habituales 802.11: Frecuencia, Velocidad, Alcance	25
Tabla 3.1: Usuarios, Servicios y Rates.....	36
Tabla 3.2: Resumen de datos técnicos de la BS y la antena	38
Tabla 3.3: Enlace PtP WiMAX. Resumen de datos calculados y simulados	43
Tabla 3.4: Red Wi-Fi interior. Datos para estudio.....	46
Tabla 3.5: Red Wi-Fi interior. Resumen de datos calculados y simulados.....	52
Tabla 3.6: Red Wi-Fi exterior. Resumen datos técnicos.	53
Tabla 3.7: Ubicación de APs en el núcleo urbano de Valdeavellano	54
Tabla 3.8: Red Wi-Fi exterior. Resumen de datos calculados y simulados.....	59
Tabla 3.9: Resumen de Red.....	61
Tabla 3.10: Resumen niveles de cumplimiento	63
Tabla 4.1: Datos para ROI	64

1. Introducción

1.1 Justificación del Trabajo

El entorno rural es un mundo aparte en lo que respecta al acceso a Internet. Los operadores de comunicaciones suelen ofrecer soluciones de precios y tarifas basadas en tecnologías ADSL o de Fibra Óptica que solo existen en los núcleos de población de las grandes ciudades. En el caso de los entornos rurales, los proveedores no suelen ofrecer soluciones de conectividad por su escasa o nula rentabilidad.

Que no haya tal oferta para este tipo de servicio no significa que no haya soluciones. Si se reside en el campo o en un pueblo pequeño, también hay formas de poder conectar a Internet. Toda una gama de tecnologías hace posible lo que se conoce como "Internet rural" permitiendo así reducir la desigualdad en el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) entre los habitantes de los centros urbanos y los habitantes de las zonas rurales. Tal efecto de desigualdad es conocido como "brecha digital". El presente proyecto pretende mitigar tal efecto en el municipio de Valdeavellano.

1.2 Definición de la necesidad

Se ha de proporcionar de forma gratuita conectividad de banda ancha a Internet al municipio de Valdeavellano, mediante la implementación de la infraestructura necesaria, para que tanto los vecinos como el consistorio tengan acceso a los diferentes servicios ofrecidos a través de Internet.

Valdeavellano es un pequeño pueblo en la provincia de Guadalajara. Su superficie total es de aproximadamente 23 Km², siendo la de su casco urbano de 100000 m² aproximadamente, y cuenta con una población de 106 vecinos censados, aunque en épocas vacacionales suele ascender hasta los 500 habitantes.



Figura 1.1: Valdeavellano

Si bien es cierto que en algunas zonas del municipio hay cobertura 3G (véase apartado 2.4.2), la calidad de la red en periodos vacacionales suele ser mala por saturación de la misma. Por tanto, la solución se basa en proporcionar cobertura Wi-Fi en todo el casco urbano del municipio, así como en el interior del edificio del Consistorio. Se implementará un enlace punto a punto basado en tecnología WiMAX [1], [2] y dos redes wifi, una de interior para dar cobertura al Consistorio y una de exterior mallada [3] para dotar de cobertura al núcleo urbano. Dicha solución se justificará a lo largo del documento.

1.3 Objetivos

El presente proyecto se centra en aportar una solución basada en telecomunicaciones inalámbricas en la que se desplegará una red Wi-Fi para que se pueda proporcionar un servicio de acceso a Internet a través de un enlace punto a punto (PtP) de banda ancha. Para alcanzar los objetivos establecidos en el desarrollo del proyecto se proponen los siguientes objetivos de trabajo:

- Se debe realizar un estudio y análisis de las tecnologías de comunicación a implementar.
- Obtención del 100% de cobertura Wi-Fi en las áreas requeridas.
- Optimizar el número de puntos de acceso (AP) necesarios para cubrir las diferentes áreas.
- Elección del equipamiento más eficiente que permita implementar QoS y seguridad 802.1x a relación calidad/coste lo más ajustada posible.

1.4 Resultados potenciales

La posibilidad de comunicar información a gran velocidad es esencial para el desarrollo de un núcleo rural. Disponer de un servicio de acceso a Internet de banda ancha permite a estos colectivos el acceso a servicios como:

- Telemedicina: La Organización Mundial de la Salud (OMS) define la Telemedicina como ...”el suministro de servicios de atención sanitaria, en los que la distancia constituye un factor crítico, por profesionales que apelan las tecnologías de la información y comunicaciones con objeto de intercambiar datos para hacer diagnósticos, mejorar e indicar tratamientos y prevenir enfermedades y heridas, así como para la formación permanente de los profesionales de atención de salud y en actividades de investigación y de evaluación, con el fin de mejorar la salud de las personas y de las comunidades en que viven”(IOM,2007) [4].

Dotar al municipio de acceso a Internet de banda ancha permitirá a los profesionales de la salud que se desplazan cada miércoles hasta la localidad el poder gestionar en tiempo real la entrega de recetas, la gestión de los registros clínicos, o poder valorar un caso en tiempo real (videoconferencia) con un especialista. Según el proveedor Lifesize [5], para una videoconferencia de calidad se precisa un ancho de banda de al menos 4 Mbps, lo que en este caso no será posible por normativa en base a la gratuidad del servicio (véase 2.3.4.1).

La posibilidad de usar la Telemedicina en el municipio aportará una mejora en el proceso de seguimiento de aquellos vecinos que necesitan de asistencia permanente, así como un ahorro de costes y tiempo en desplazamientos.

- Servicios de administración en línea: La banda ancha permite acceder a la prestación de servicios telemáticos de las diferentes administraciones (públicas o privadas) mejorando la interacción entre administraciones y usuarios. La mayor parte de operaciones se realizan a través de plataformas web usando navegación segura (https). También suele ser habitual la confirmación vía mail del estado del proceso realizado. En ambos casos, navegación y correo, disponer de 256 Kbps debe de ser suficiente para un servicio de calidad, con el consiguiente ahorro de tiempo y costes por desplazamiento.
- Educación: En disposición de banda ancha se puede mejorar el proceso de aprendizaje, así como la capacitación de los vecinos. Además, se facilita la comunicación entre los organismos públicos con competencias en educación y las asociaciones culturales, las cuáles en zonas rurales suelen adquirir el compromiso de fomentar actos educativos en su localidad, como es el caso de la Asociación Amigos de Valdeavellano (AAVV).

Las plataformas de educación en línea ofrecen la mayor parte de sus servicios vía web, pudiendo incluir textos, chat, foros, correo electrónico, audios, vídeos, e incluso videoconferencia. La solución que se propone en el presente proyecto habilitará el accesos a la mayor parte de tales servicios, ya que se debe considerar que para la visualización de video-streaming la calidad de reproducción dependerá del ancho de banda disponible, a modo de ejemplo [6], para la reproducción de vídeo con calidad 1080p se requerirá entre 4-6 Mbps. Al igual que lo expuesto en Telemedicina, el acceso a estos servicios queda limitado a los 256 Kbps fijados por normativa.

- Desarrollo rural: En zonas rurales, la banda ancha desempeña un papel importante en conectar a los negocios locales (granjas, turismo, etc.) con los mercados, contribuyendo al desarrollo de la economía rural. Se facilita, por tanto, la opción de negocio a negocio (B2B). En este caso las necesidades de ancho de banda son similares a las expuestas en el apartado de Educación.
- Ocio: Permite el acceso a servicios que contribuyan al ocio, un aspecto que también es importante. En el municipio hay gran número de aficionados a los juegos en red y a eventos tipo "lan party". Teniendo en consideración que lo más importante para jugar en línea es que la latencia sea lo menor posible, así como disponer de un ancho de banda de subida alto, la solución propuesta en este proyecto no podrá cubrir tal servicio en cuanto a ancho de banda a Internet se refiere, pero sí permite montar un servidor local que provea los juegos.

1.5 Enfoque y metodología

Como comienzo, se aborda una primera fase de documentación en la que se presenta el estudio del arte de las tecnologías WiMAX y Wi-Fi en las que se basa la propuesta (véase capítulo 2). A continuación se aborda la toma de requisitos, los cuáles han de cubrir las necesidades de cobertura y capacidad de las diferentes redes a implementar.

Una vez se haya concretado tanto la necesidad cómo los requisitos necesarios para cubrirla, se abordará la fase de análisis y diseño, en la cual se ha de obtener la solución a implementar.

1.6 Planificación

1.6.1 Fases

Para garantizar la consecución del objetivo final se han de abordar y cumplir las siguientes fases de trabajo:

- Fase de documentación: Estudio del arte sobre las tecnologías inalámbricas y en especial de WiMAX y Wi-Fi.
- Fase de toma de requisitos: En base a la necesidad de cobertura y capacidad se analizan los diferentes requisitos necesarios, así como la viabilidad, para poder abordar el Proyecto.
- Fase de análisis y diseño: Contendrá el caso de estudio de la red a implementar. Se hará uso de herramientas como Google Earth y RadioMobile para el estudio de los perfiles del terreno, así como de las coberturas para obtener el grado de viabilidad.

1.6.2 Diagrama de Gantt

A continuación, en la Figura 1.2 se puede ver la planificación para la realización del Proyecto.

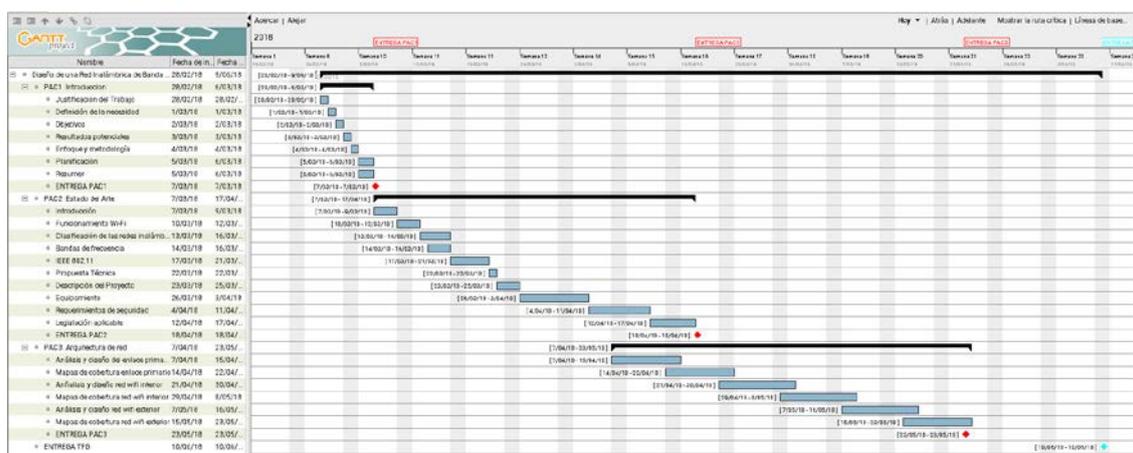


Figura 1.2: Planificación del Proyecto

Para mayor claridad, a continuación se presenta el detalle de la planificación para cumplir cada hito de entrega, de tal manera que en la Figura 1.3 se puede ver la planificación para realizar los trabajos referentes a la PAC1, en la Figura 1.4 los necesarios para la entrega de la PAC2, y en la Figura 1.5 los relacionados a la entrega de la PAC3. Tras la entrega de la PAC3 se dispondrá

de 18 días para preparar la entrega del documento final del Proyecto, véase Figura 1.6.



Figura 1.3: Planificación para PAC1

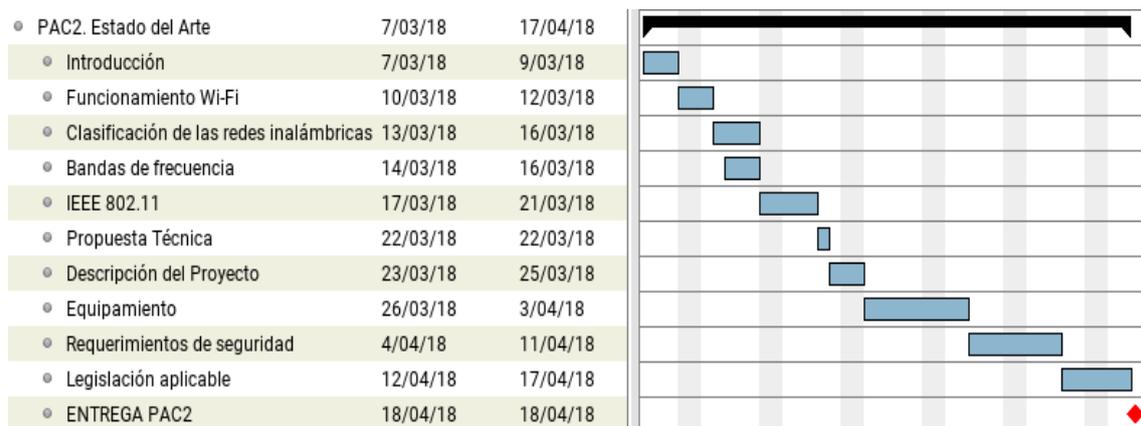


Figura 1.4: Planificación para PAC2

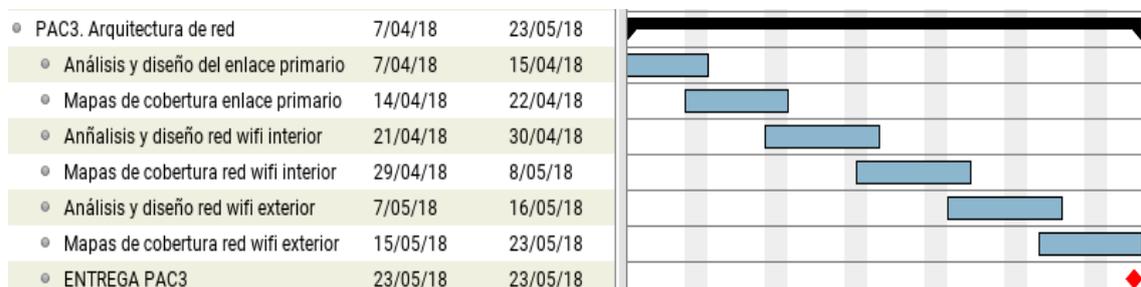


Figura 1.5: Planificación para PAC3



Figura 1.6: Planificación entrega TFG

A día 10 de junio, se cumple con la planificación, presentando el documento final con todo el contenido.

1.7 Resumen

Este documento está dividido en los siguientes capítulos:

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN: tiene como objetivo proporcionar una idea aproximada de los objetivos de este proyecto y las razones que llevaron a su desarrollo, así como los principales hitos que se llevarán a cabo durante el ciclo de vida del proyecto.

CAPÍTULOS 2. ESTADO DEL ARTE: Muestra una introducción a las diferentes tecnologías inalámbricas, así como la realización de un estudio más completo sobre las diferentes tecnologías inalámbricas que pueden satisfacer las necesidades del proyecto.

CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO: Se presentará el análisis de las necesidades del municipio de Valdeavellano. Se aportará una solución óptima para las redes de telecomunicaciones justificada de forma teórica y mediante simulaciones de cobertura y capacidad.

CAPÍTULO 4. VALORACIÓN ECONÓMICA: Se presentará la relación de costes necesarios para abordar el proyecto.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN: Contendrá la conclusión final, en la que se justificará el resultado obtenido.

CAPÍTULO 6. GLOSARIO: Ha de contener la relación de términos utilizados a lo largo del documento y su significado.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFIA: Este apartado contendrá las referencias bibliográficas utilizadas para el desarrollo del presente trabajo.

CAPÍTULO 8. ANEXOS: Contendrá información relevante para el desarrollo del contenido de capítulos anteriores, como puede ser cálculos teóricos o datos técnicos del equipamiento seleccionado.

2. Estado del Arte

2.1. Introducción

En este capítulo se tratarán temas conceptuales relevantes sobre las redes inalámbricas y que se han de tener en consideración para el desarrollo del presente trabajo final de grado (TFG), como pueden ser los estándares de las redes inalámbricas, las posibles arquitecturas de red, los elementos básicos que componen cada tecnología, así como conceptos teóricos sobre la capa física y la capa de enlace.

Las redes inalámbricas ofrecen ciertas ventajas sobre las redes cableadas, tales son, movilidad, flexibilidad escalabilidad, simplicidad y costes reducidos de instalación. En ocasiones pueden ser la única solución, bien por dificultad orográfica o por la imposibilidad legal de la realización de obra, como es el caso de edificios de valor histórico. A modo de ejemplo, en USA se ha implantado en la asociación de bibliotecas *Marin Country Free Library* soluciones Wi-Fi a costos mucho menores de lo que hubiese salido con redes cableadas, además de favorecer la movilidad en toda la biblioteca al tener conexión en cualquier punto (Del Valle Martínez, Juan Carlos, 2008).

2.2 Clasificación de las redes inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas, en base a su alcance, es decir, considerando la distancia máxima a la que se pueden ubicar las dos partes que establecen el enlace de comunicación, pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- **Wireless Personal Area Network (WPAN)** [7]: WPAN es una red para interconectar dispositivos centrados en el área de trabajo de un individuo. WPAN se basa en el estándar IEEE 802.15. Los dos tipos más representativos son *Bluetooth* e infrarojos (*Infrared Data Association*). Las frecuencias operativas propuestas son entorno a los 2,4 GHz.
- **Wireless Local Area Network (WLAN)** [8]: Se basa en la interconexión de dos o más dispositivos mediante comunicación inalámbrica dentro de un área limitada, como un hogar, escuela o edificio de oficinas. Esto les da a los usuarios la capacidad de moverse dentro de un área de cobertura local manteniendo la conectividad a la red. Dicha conectividad puede ser ampliada a Internet por medio de un dispositivo encaminador (*router*). Se basan en los estándares IEEE 802.11 y, como ya se ha mencionado en el punto 2.1, se comercializan bajo la marca Wi-Fi.
- **Wireless Metropolitan Area Network (WMAN)** [9]: WMAN es un tipo de red inalámbrica que conecta varias LAN inalámbricas. WiMAX es el tipo más representativo y queda descrito por el estándar IEEE 802.16.
- **Wireless Wide Area Network (WWAN)** [9]: Se trata de redes inalámbricas que generalmente cubren áreas extensas, como ciudades y municipios vecinos o incluso ciudades. Se pueden usar para conectar sucursales de negocios o como un sistema público de acceso a Internet. Las conexiones inalámbricas entre los puntos de acceso suelen ser enlaces punto a punto. Los estándares IEE 802.20 o UMTS son los más representativos.

A continuación, en la Tabla 2.1 se muestra una comparativa de las principales tecnologías de comunicaciones inalámbricas expuestas.

Red	WWAN	WMAN	WLAN	WPAN
Estándar	GSM/GPRS/UMTS	IEEE 802.16	IEEE 802.11	IEEE 802.15
Nombre	2G/3G/4G	WiMAX	WiFi	Bluetooth, Zigbee
Velocidad	9.6/170/2000 Kb/s	15-134 Mb/s	1-2-11-54-300-1000 Mb/s	721 Kb/s
Frecuencia	0.9/1.8/2.1 GHz	2-66 GHz	2.4 & 5 GHz	2.4 GHz
Distancia	Limited by cells (max 35 Km per cell)	1.6 - 50 Km	30 - 150 m	10 m
Modulación	WCDMA	QPSK, OFDM, OFDMA	FHSS, DSSS, OFDM	FHSS
Itinerancia	Si	Si (802.16e)	Si	No

Tabla 2.1: Clasificación por alcance de las principales tecnologías inalámbricas

En el presente proyecto, y en base a la clasificación anterior, la tecnología WiMAX se utilizará para el enlace. Además se hará uso de tecnología Wi-Fi para implementar una red wifi de interior con la capacidad [10] y cobertura necesaria, así como una red wifi mallada (802.11s) de exterior.

2.3. Wi-Fi. IEEE 802.11

2.3.1 Introducción

Inicialmente, era muy común que las redes inalámbricas se implementasen utilizando soluciones particulares de cada fabricante, ya que los diferentes dispositivos que existían en el mercado eran incompatibles entre sí. Para normalizar la situación, se desarrolló un sistema que fue aceptado por todos los fabricantes como un estándar común. De esta forma, se creó la asociación WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), ahora conocida como Wi-Fi Alliance, cuyo objetivo era designar una marca que promoviera la tecnología inalámbrica y garantizara la compatibilidad de los equipos.

Wi-Fi es el término que referencia ciertos tipos de redes inalámbricas de área local (WLAN) y que usan especificaciones en base a los estándares definidos en la familia 802.11 que permite a los dispositivos certificados para Wi-Fi Direct el intercambio de datos sin una conexión a Internet o un enrutador inalámbrico. Los productos que superen las pruebas estipuladas por la Wi-Fi Alliance, en lo que se refiere a interoperabilidad, seguridad y protocolos específicos, se les cataloga con la etiqueta "Wi-Fi CERTIFIED".

La tecnología Wi-Fi es ampliamente utilizada como una alternativa a soluciones LAN cableadas, principalmente si la implementación con cable es muy costosa o difícil de implementar debido a las condiciones orográficas, como suele ser habitual en las zonas rurales.

2.3.2 ¿Cómo funciona Wi-Fi?

Una red Wi-Fi utiliza ondas de radio para transmitir de forma inalámbrica información a través de una LAN. El alcance queda delimitado por las

características de los dispositivos, así como del entorno, aunque puede ser ampliado por medio de dispositivos que hagan la función de repetidor Wi-Fi. Los dispositivos (computadora, teléfono inteligente, etc.) han de estar dotados de un adaptador inalámbrico para traducir los datos transmitidos vía ondas de radio. Se tratará en más detalle a lo largo del apartado 2.3.3.

Las señales Wi-Fi se transmiten en las bandas de 2,4 y 5 GHz. La señal se transmite entre el adaptador y un enrutador, el cual se encarga de enviar la información a Internet u otra red. El uso de las bandas de frecuencia mencionadas no requiere una licencia para su uso (véase apartado 2.3.4.2).

2.3.3 Arquitectura

Tal y como indica William Stallings, la arquitectura de una LAN se describe mejor en términos de una estratificación de protocolos que organizar las funciones básicas de la LAN (William Stallings, 2005, pág 422). En este apartado se tratará las capas física y de acceso al medio en el estándar 802, y en los puntos 2.3.3.1 y 2.3.3.2 más en detalle para 802.11.

En términos del modelo OSI, los protocolos de capa superior (capa 3 o 4 y superiores) son independientes de la arquitectura de red y son aplicables a redes LAN, MAN y WAN. Por tanto, una discusión de los protocolos LAN se refiere principalmente a las capas inferiores del modelo OSI.

La Figura 2.1 relaciona los protocolos LAN con la arquitectura OSI. Esta arquitectura fue desarrollada por el comité IEEE 802 y ha sido adoptada por todas las organizaciones que trabajan en la especificación de estándares LAN. Generalmente se lo conoce como modelo de referencia IEEE 802.

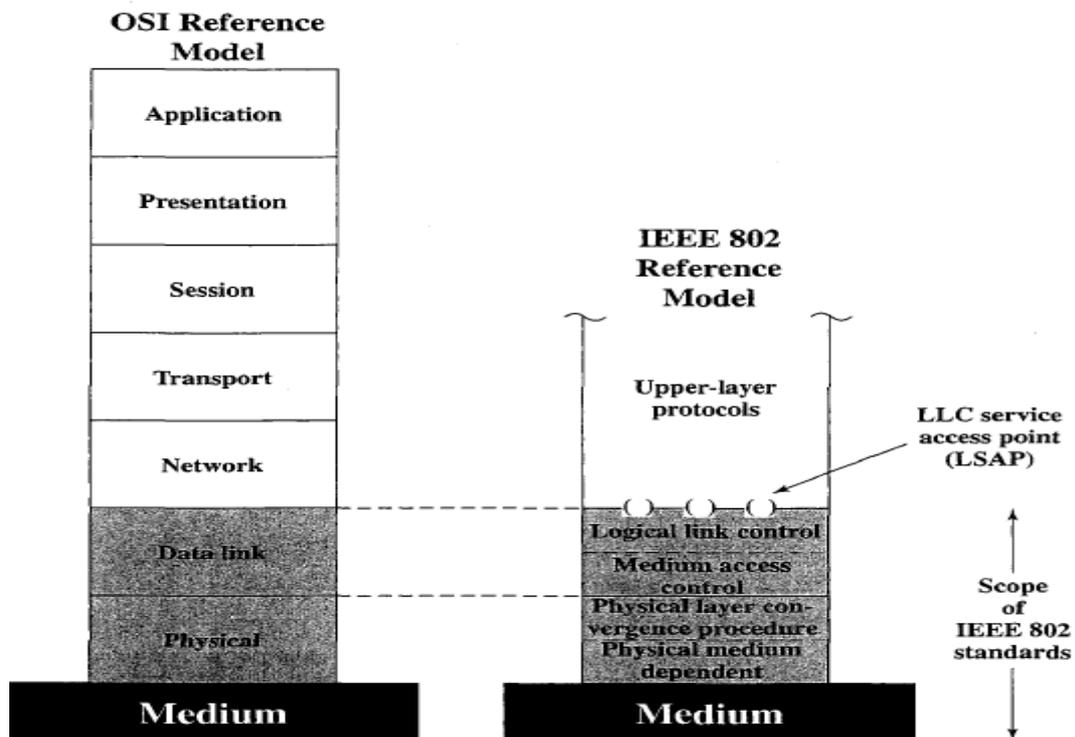


Figura 2.1: Comparativa de las capas de protocolos IEEE 802 con el modelo OSI
Fuente: William Stallings. Wireless Communications and Networks [12]

Trabajando de abajo hacia arriba, la capa más baja del modelo de referencia IEEE 802 corresponde a la capa física del modelo OSI e incluye funciones tales como:

- Codificación / decodificación de señales (por ejemplo, PSK, QAM, etc.)
- Generación / eliminación de preámbulo (para sincronización)
- Recepción / transmisión de bits

Además, la capa física del modelo 802 incluye una especificación del medio de transmisión, así como la topología. La elección de ambos es fundamental en el diseño de una red LAN, es por ello que se incluye una especificación del medio. En IEEE 802 la capa física se subdivide en dos subcapas:

- **Physical layer convergence procedure (PLCP):** Define un método de mapeo de *802.11 MAC layer protocol data units* (MPDU) en un formato de trama adecuado para enviar y recibir datos de usuario e información de gestión entre dos o más estaciones que utilizan la subcapa PMD asociada.
- **Physical medium dependent sublayer (PMD):** Define las características, así como el método de transmisión y recepción de datos del usuario a través de un medio inalámbrico entre dos o más estaciones.

Por encima de la capa física están las funciones asociadas con la prestación del servicio a los usuarios de la red. Éstas incluyen:

- En la transmisión, ensamblaje de datos en una trama que ha de contener los campos de detección de error y dirección.
- En la recepción, desensamblar la trama y llevar a cabo el reconocimiento de dirección y detección de error.
- Controlar el acceso al medio de transmisión.
- Proporcionar una interfaz para capas superiores y realizar control de flujo y error.

Estas son funciones típicamente asociadas con la capa 2 del modelo OSI. El conjunto de funciones en el último elemento de la Figura 2.1 está agrupado en la capa de control de enlace lógico (LLC, 'Logical Link Control'). Las funciones en los primeros tres elementos de la Figura 2.1 se tratan como una capa separada, llamada control de acceso al medio (MAC, 'Medium Access Control'). Tal separación se realiza por las siguientes razones:

- La lógica necesaria para gestionar el acceso a un medio de acceso compartido no se encuentra en el control de enlace de datos (DLC, 'Data Link Control') de la capa 2.
- Para la misma LLC, se pueden proporcionar varias opciones de MAC.

La Figura 2.2, ilustra la relación entre los niveles de la arquitectura. Los datos de nivel superior se pasan a LLC, que agrega información de control como la cabecera y crea una unidad de datos de protocolo (PDU, 'unidad de datos de protocolo') LLC. Esta información de control se usa en la operación del

protocolo LLC. Toda la PDU LLC se pasa luego a la capa MAC, que agrega información de control en la parte inicial y final del paquete, formando una trama MAC. De nuevo, la información de control en la trama es necesaria para el funcionamiento del protocolo MAC. En tal contexto, la Figura 2.2 también muestra el uso de TCP/IP y una capa de aplicación sobre los protocolos LAN.

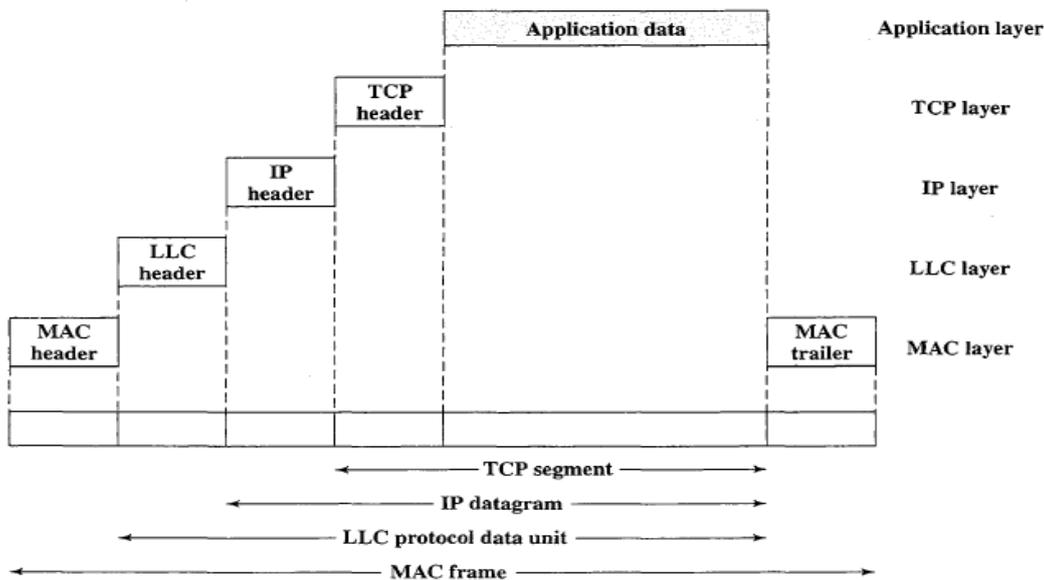


Figura 2.2: Protocolos en contexto

Fuente: William Stallings. Wireless Communications and Networks [12]

En conclusión, IEEE 802.11 cumple con la arquitectura IEEE 802 establecida para redes LAN. La norma IEEE 802 define exclusivamente los temas relacionados con las dos primeras capas del modelo OSI: La capa física, que se corresponde totalmente con la capa física del modelo OSI y la capa de enlace, que en el estándar 802.11 al igual que en parte de los protocolos 802 se divide en dos subcapas.

2.3.3.1 Capa Física (PHY)

PHY define las características eléctricas y funcionales del canal de comunicación. Se encarga del intercambio de tramas entre PHY y MAC, para lo que hace uso de portadora de señal y modulación de espectro ensanchado para la transmisión de tramas a través del medio y proveer al protocolo MAC de un indicador de detección de portadora para señalar la actividad en el medio. Además define los métodos por los que se difunde la señal. PHY se divide en dos subcapas conocidas como PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) encargada de convertir los datos a un formato compatible con el medio físico y PMD (Physical Medium Dependent) con la función de difundir la señal.

2.3.3.1.1 Physical Layer Convergence Procedure (PLCP)

PLCP es la subcapa superior de la capa física y tiene como misión básica la aplicación de un procedimiento de convergencia que permita convertir MPDUs en PPDU y viceversa. Se encarga pues de la transformación de los datos a un formato compatible con el medio físico. En el proceso de transmisión, a la MPDU se le adicionará un preámbulo y una cabecera que darán origen a la formación de la PDU. En el receptor se procesarán el preámbulo y la

cabecera y se despachará la MPDU. En la Figura 2.3 se muestra la estructura de una trama PLCP.

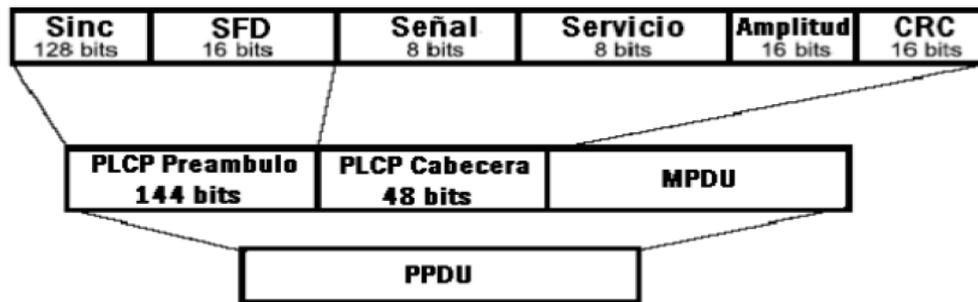


Figura 2.3: Trama PLCP
Fuente: López Ortiz, F. Wireless LAN

Se puede observar que la trama PLCP consta de tres campos:

- **Preámbulo:** Utilizado por el receptor para tratar la señal entrante y sincronizar con el demodulador. Indica inicio de trama. Contiene los campos de Sincronización (SINC) y Delimitador del Inicio de Trama (SFD).
- **Cabecera PLCP:** Contiene información, como la duración o la velocidad de transmisión, referente al paquete transmitido por el protocolo MAC, así como los campos de Señalización IEEE 802.11 (SEÑAL), que indicará la modulación que será usada para la transmisión y la recepción, Servicio IEEE 802.11 (SERVICIO), Longitud (AMPLITUD) que indica los microsegundos requeridos para transmitir la MPDU, y CRC que protege a los campos SEÑAL, SERVICIO y AMPLITUD.
- **Payload:** PDU-PLCP son los datos entregados por la MAC.

El conjunto de estos tres campos dan el formato general de una trama PLCP y conforman lo que se llama PHY Protocol Data Unit (PPDU).

2.3.3.1.2 Physical Medium Dependent (PMD)

PMD gestiona las características particulares del medio inalámbrico y define los métodos para transmitir y recibir datos en el medio. Se basa en la técnica conocida como espectro expandido. Se trata de una técnica de modulación para la transmisión de datos digitales y por radiofrecuencia. El ancho de banda real utilizado en la transmisión es superior al estrictamente necesario. Esto hace del sistema resistente a las interferencias de otras fuentes de emisión, lo que le permite coexistir con otros sistemas de radiofrecuencia sin verse afectado.

IEEE 802.11 tiene posibilidad de usar diferentes técnicas de transmisión que posibilitan el envío de tramas MAC de una estación (STA) a otra, dependiendo de la velocidad a la que se vayan a transmitir los datos. En la Tabla 2.2 se muestran las técnicas de difusión utilizadas por los principales estándares 802.11.

Protocolo	Técnica Difusión
802.11	IR, FHSS, DSSS
802.11a	OFDM
802.11b	DSSS
802.11g	DSS, OFDM
802.11n	OFDM, MIMO
802.11ac	OFDM, MIMO

Tabla 2.2: Modulaciones en principales estándares 802.11

A día de hoy la inmensa mayoría de las estaciones utilizan el estándar 802.11n, lo que significa que los puntos de acceso también, aunque estos últimos también pueden usar el 802.11ac, por ejemplo, para mejorar la capacidad de una red mallada. Es por ello que a continuación se detallan las modulaciones usadas por ambos estándares.

- **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión, el cual envía un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias. El ancho de banda se fragmenta en canales más pequeños que operan en paralelo consiguiendo velocidades de transmisión de hasta 54 Mbps.

Mediante el uso de diferentes técnicas de modulación, OFDM puede transmitir datos a distintas velocidades. Las velocidades normalizadas que admite son 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 y 54 Mbps. En la Tabla 2.3 se muestra un resumen de las mismas.

Tasa de transferencia (Mbps)	Modulación
6	BPSK
9	BPSK
12	QPSK
18	QPSK
24	16-QAM
36	16-QAM
48	64-QAM
54	64-QAM

Tabla 2.3: Modulaciones OFDM

- **MIMO** (Multiple Input Multiple Output). Se trata de una tecnología que hace uso de múltiples antenas transmisoras y receptoras para mejorar la eficiencia del sistema, permitiendo así una transmisión de mayor información que al utilizar una sola antena. El sistema se basa en desfazar la señal, de tal manera que los rebotes de la señal (reflexiones) proporcionen mayor velocidad. Esto se debe a que al haber menor pérdida de datos, se necesitan menos retransmisiones, lo que repercute

en una mayor velocidad. En definitiva, MIMO aprovecha fenómenos físicos como la propagación multitrayecto para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error.

Otra característica de MIMO es el Multiplexado de División Espacial (SDM). SDM multiplexa espacialmente flujos de datos independientes y transferidos de forma. Gracias a la utilización de SDM se aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica.

MIMO ha tenido gran aceptación, ya que aumenta de forma significativa la tasa de transferencia utilizando diferentes canales en la transmisión, así como la multiplexación espacial por disponer de antenas físicamente separadas. Los estándares 802.11n y 802.ac hacen uso de esta modulación y es por ello que son los elegidos para configurar las redes Wi-Fi del presente proyecto.

2.3.3.2 Capa de acceso al medio (MAC)

En base al modelo OSI, los niveles que conforman la capa de enlace son dos: MAC (Medium Access Control) y LLC (Logical Link Control). En el caso del estándar 802.11 el más relevante es MAC.

La capa MAC define los procedimientos que hacen posible que los distintos dispositivos compartan el uso del espectro radioeléctrico. Mientras que las distintas versiones del estándar 802.11 hacen uso de distintos sistemas para la difusión de la señal (la capa física es distinta), la capa MAC es la misma para todos los estándares.

Las funciones principales de la capa MAC son:

- **Exploración:** Proceso por el cual una estación identifica la existencia de una determinada red. En dicho proceso se envían señales que identifican la estación, estas incluyen los SSID (Service Set Identifiers), y los ESSID (Extended SSID) con una longitud máxima de 32 caracteres.
- **Autenticación:** Establece la identidad de las estaciones y autoriza la asociación. En el caso inalámbrico la posibilidad de un acceso más libre origina el uso en el estándar 802.11 de dos opciones de autenticación: Autenticación de sistema abierto y Autenticación de Clave compartida.
 - **Autenticación de Sistema Abierto:** Se trata del único modo de autenticación obligatoria en 802.11. Se suele asociar con el filtrado MAC. Una estación envía una solicitud de autenticación con su SSID a un AP, el cual autorizará o no el acceso. La identificación de una estación en 802.11 se hace por medio de la transmisión de la dirección MAC de dicha estación. La respuesta a la solicitud de autenticación la realiza el AP, y lo hace enviando en una trama el identificador del algoritmo de autenticación, el número de secuencia de transacción de autenticación y el código de estado indicando el resultado del requerimiento.

- **Autenticación de Clave compartida:** Ambas partes de la conexión deben implementar el mismo algoritmo a utilizar. Es relevante decir que hoy en día WEP es del todo inseguro y no se aconseja su uso si se tiene en consideración la seguridad como factor imperativo. En tal caso, la recomendación es utilizar una solución basada en 802.11i. El proceso se inicia de igual forma que en el caso anterior. A continuación la estación envía el identificador de algoritmo de autenticación, el número de secuencia de transacción de autenticación, y un texto de 128 bytes denominado texto de desafío (interrogatorio del AP al cliente) . El AP recibe la información, la descripta y controla la integridad del mismo. Si tuvo éxito envía un código de estado de aceptación.
- **Asociación:** Proceso que dará acceso a la res y solo se realizará tras un fin exitoso del proceso de autenticación.
- **Seguridad:** En el caso de hacer uso de WEP solo se cifran los datos, las cabeceras quedarían sin cifrar. Tal y como ya se ha comentado se desaconseja el uso de tal protocolo por su debilidad, en beneficio de WPA, o mejor aún WPA2.
- **Señales de control RTS/CTS:** Por medio de ellas se realiza la administración del canal. Definen el tamaño de trama, que en 802.11 es entre 256 y 2312 bytes.
- **Gestión de potencia:** Los APs conocen que la estación está en modo de ahorro de energía y colocan en su buffer las tramas de dichas estaciones.
- **Fragmentación:** Un AP puede dividir la información en tramas de menor tamaño y garantizar así su recepción.
- **Otros:** Sincronización, direccionamiento, comprobación de errores, itinerancia dentro de un ESS son funciones realizadas por MAC.

La capa MAC es similar en 802.11 y en 802.3 (Ethernet), ambas hacen uso del protocolo de acceso al medio CSMA (Carrier-Sense Multiple Access, 'Acceso múltiple con Escucha de Señal Portadora). No obstante, difieren en la tecnología usada para la gestión de colisiones, Ethernet utiliza CD (Collision Detection), mientras que en la versión inalámbrica se utiliza CA (Collision Avoidance). Una colisión se produce cuando dos estaciones intentan hacer uso del medio de forma simultánea. CD detecta que se ha producido una colisión y retransmite los datos. CA implementa procedimientos que evitan que se produzcan colisiones.

En el medio radioeléctrico una estación no puede transmitir y recibir en el mismo instante temporal haciendo uso del mismo canal, por lo que, al no poderse detectar las posibles colisiones, se ha de disponer de mecanismos que las evite.

Entre la capa MAC y la capa física se intercambian paquetes de datos de control, gestión e información. Para coordinar la transferencia de datos, la arquitectura MAC incluye las funciones de coordinación distribuida (DCF) y la función de coordinación de punto (PCF), que determinan dentro de un BSS, cuándo una estación puede transmitir y/o recibir datos de protocolo a nivel MAC a través del medio inalámbrico.

- **DCF (Distributed Coordination Function):** La función de coordinación distributiva se ubica en el nivel inferior. Basa su funcionamiento en técnicas de acceso aleatorio de contienda. Tales técnicas producen retardos, por lo que el tráfico es asíncrono, ya que en el tráfico síncrono un retardo no es predecible. Las estaciones compiten de forma simultánea por el acceso al canal, y para ello se vale de las técnicas de Acceso Múltiple con Escucha de Señal Portadora y prevención de colisiones (CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) [13], la cual hace uso de un algoritmo binario exponencial denominado *backoff* y la de acceso múltiple con prevención de colisión MACA (CSMA/CA con RTS/CTS) [Karn 1990]. Tales técnicas permiten la negociación entre estaciones para acceder al medio físico y garantizar la entrega de datos.

Si una estación tiene una trama MAC para transmitir, CSMA testea el medio antes de transmitir para verificar que está libre, en cuyo caso la estación puede realizar la transmisión. En caso contrario, la estación debe esperar a que la transmisión que se esté llevando a cabo en el canal finalice. El mecanismo por el que se valora la disponibilidad del canal se denomina CCA (Clear Channel Assessment).

- **PCF (Point Coordination Function):** Se trata de un método de acceso alternativo implementado en la parte superior de DCF. PCF alterna dos periodos de tiempo: periodos con conflictos (CP, Contention Period) y periodos libres de conflictos (CFP, Contention Free Period). Durante los CP las estaciones simplemente utilizan DCF. Durante los CFP el punto de coordinación (AP) controla qué estación puede transmitir en cada momento de manera síncrona mediante un algoritmo Round-Robin.

2.3.3.3 Componentes

En esta sección se definen diversos términos utilizados en una arquitectura de red inalámbrica. Sin embargo, no todas las entradas de una arquitectura genérica existen en todas las tecnologías y su funcionalidad exacta puede diferir.

La arquitectura lógica del estándar 802.11 [12] puede contener los siguientes componentes:

- Estación (STA): Dispositivo (Ordenador, PDA, teléfono, etc.) con capacidad de poder conectar a la red inalámbrica.
- Punto de acceso inalámbrico (AP): Dispositivo que habilita la conexión de las estaciones a la red inalámbrica, a la vez que hace de puente entre las estaciones y la red troncal existente. También se conocen como estación base (BS).

- Conjunto independiente de servicios básicos (IBSS): Red ad hoc que no contiene APs, lo que implica la imposibilidad de conectar a otro BSS.

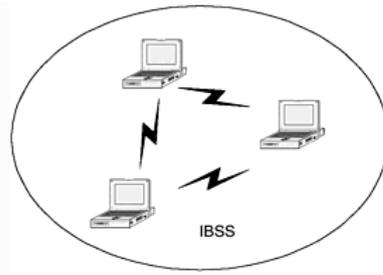


Figura 2.4: IBSS

Fuente: <https://flylib.com/books/en/4.215.1.104/1/>

- Conjunto de servicios básicos (BSS): Un BSS lo conforma un AP con todas las estaciones asociadas.

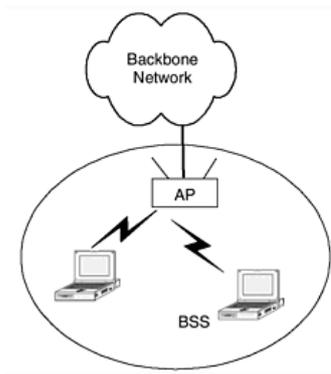


Figura 2.5: Conjunto de Servicios Básicos (BSS)

Fuente: <https://flylib.com/books/en/4.215.1.104/1/>

- Servicios extendidos (ESS): Conjunto de uno o más BSS interconectados y que se muestran como un único BSS a la capa de control de enlace lógico de cualquier estación asociada.
- Red de distribución (DS): mecanismo por el cual diferentes puntos de acceso pueden intercambiar tramas entre sí o bien con las redes cableadas, si las hubiera

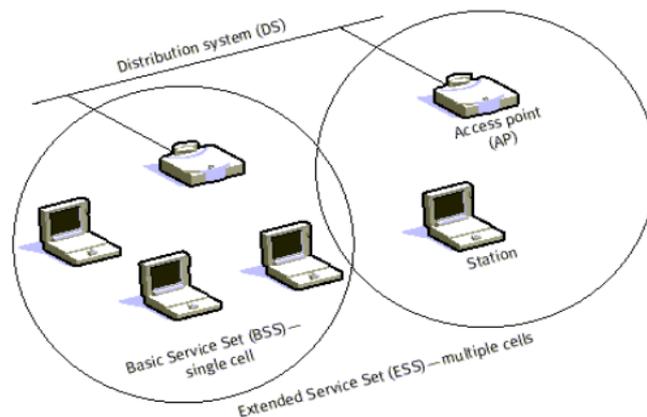


Figura 2.6: Conjunto de Servicios Extendidos (EBSS)

Fuente: http://www.tutorial-reports.com/wireless/wlanwifi/wifi_architecture.php

2.3.3.4 Servicios

El estándar IEEE 802.11 define nueve servicios [12] que una red inalámbrica ha de proveer para proporcionar una funcionalidad equivalente a la que es inherente a las redes cableadas. En la Tabla 2.4 se enumeran tales servicios y se indica dos formas de categorizarlos.

1. El proveedor del servicio puede ser la estación o el sistema de distribución (DS). Los servicios de estación se implementan en cada estación 802.11, incluidas las estaciones de punto de acceso (AP). Los servicios de distribución se proporcionan entre los conjuntos de servicios básicos (BSS); estos servicios pueden implementarse en un AP o en otro dispositivo de propósito especial adjunto al sistema de distribución.
2. Tres de los servicios se utilizan para controlar el acceso a la LAN IEEE 802.11, así como la confidencialidad. Los otros seis servicios se utilizan para respaldar la entrega de las unidades de datos de servicio de MAC (MSDU) entre estaciones.

Servicio	Proveedor	Uso
Association	Sistema de distribución	Entrega de MSDU
Autenticación	Estación	Acceso a la red y seguridad
Desautenticación	Estación	Acceso a la red y seguridad
Desasociación	Sistema de distribución	Entrega de MSDU
Distribución	Sistema de distribución	Entrega de MSDU
Integración	Sistema de distribución	Entrega de MSDU
Entrega de MSDU	Estación	Entrega de MSDU
Privacidad	Estación	Acceso a la red y seguridad
Reasociación	Sistema de distribución	Entrega de MSDU

Tabla 2.4: Servicios IEEE 802.11

Fuente: William Stallng. Wireless Communications and Networks, pág 441 [12]

2.3.3.5 Modos de configuración

El estándar IEEE 802.11, tal y como se ha comentado en el punto anterior, contempla dos tipos de dispositivos: las estaciones (STA) y los puntos de acceso a la red (AP). En función de su configuración se pueden obtener dos modos de arquitectura para una red inalámbrica: ad-hoc e infraestructura.

- Modo ad-hoc: También conocido como redes entre clientes. Las STAs se comunican entre sí sin la intermediación de ningún dispositivo común, se trata pues de una red aislada, es decir, punto a punto.
- Infraestructura: Las STA se conectan entre sí y con la red a través de APs, que actúan como pasarela entre la red inalámbrica y la cableada.

2.3.4 Marco legal y regulación del espectro.

El presente proyecto a nivel normativo se enmarca en dos ámbitos, por un lado el acceso a servicios internos como puede ser la Intranet, que legalmente no debe plantear problema legal, y por otro lado el deseo del Ayuntamiento por dotar de acceso a Internet de forma gratuita a los vecinos dentro del casco urbano en zonas públicas: calles, plazas, parques y centro cultural en el interior del Consistorio.

En este último caso, se debe tener en consideración la legislación vigente para no incurrir en faltas que la CMT o cualquier operador pudiera entender que el servicio supone una amenaza para el mercado de las telecomunicaciones. Además se ha de considerar, que siendo la salida a Internet a través de una ADSL de un subscriptor particular, no existe ninguna cláusula en el contrato con el operador que impida compartir la conexión.

2.3.4.1 Legislación vigente

Como se ha indicado anteriormente, se va a proporcionar un acceso inalámbrico gratuito, y para ello se ha de tener en cuenta la siguiente normativa vigente que regula las instalaciones de redes inalámbricas y el uso espectral:

- Regulación de Telecomunicaciones: Ley 9/2014, de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones [36, página 4] cuyo ámbito de aplicación es la regulación de la explotación de las redes y de los servicios de comunicaciones electrónicas, así como de los recursos asociados. Circular 1/2010 [37] por la que se establecen las condiciones para la prestación de servicios de comunicaciones electrónicas por las Administraciones Públicas. De la lectura de ambos documentos se concluye que se ha de cumplir con los siguientes requisitos:
 - Será necesaria la inscripción de la promotora (Ayuntamiento) en el registro de operadores de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT).
 - Dicha notificación podría no ser necesaria si se considera que el servicio es en régimen de autoprestación.
 - Al tratarse de una Administración Pública, si la prestación del servicio lleva implícita una Ayuda de Estado, el proyecto habrá de ser notificado a la Comisión Europea.
 - Limitación de velocidad entre red y usuarios de 256 Kbps.
 - Se establecerá limitaciones de acceso a ciertas webs.
 - Se ha de garantizar el secreto de las comunicaciones.
 - Se requiere separación contable del servicio prestado con respecto al resto de actividades de la promotora.
- Emisiones Radioeléctricas: Real Decreto RD1066/2001, de 28 de septiembre [36, página 682], donde se definen las restricciones básicas sobre los campos electromagnéticos, tal y como se puede ver en la Tabla 2.5.
- Gestión del Espectro Radioeléctrico: Notas UN-58, UN-128 y UN-143. Se tratan en mayor detalle en el siguiente apartado.

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μ T)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m^2)
0-1 Hz		$3,2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	
3-150 kHz	87	5	6,25	
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	
1-10 MHz	$87f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2.000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Tabla 2.5: Restricciones básica para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz)

Fuente: RD1066/2001 [36, página 691]

2.3.4.2 Regulación del espectro

La regulación del espectro se obtiene mediante la asignación de bandas en función al uso de la red según la Ley 9/2014:

- Uso común: Exclusivamente en banda ISM. No se precisa de licencia habilitante, pero no se puede reclamar protección ni la existencia de interferencias frente a servicios de otras categorías. La solución del presente proyecto se basará en este tipo de bandas.
- Uso especial: Compartido, sin exclusión de terceros. Radioafición y otros sin valor económico.
- Uso privado: Se requiere licencia para su uso. Queda asociado a un servicio determinado o uso de una red de telecomunicaciones.

La atribución de bandas de frecuencia a nivel internacional queda regulado por el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT. En lo referente a nivel nacional es competencia del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) dependiente del Ministerio de Industria. Por tanto, la normativa de CNAF regula las condiciones de utilización del espectro en el Estado español por el que se hace la atribución de frecuencias en función del uso, las potencias de emisión y los protocolos que hay que utilizar en cada banda

La limitación de potencias máximas de emisión está orientada a buscar un equilibrio entre la cobertura de los puntos de acceso y las posibles interferencias entre emisores. En el caso de las bandas de uso común del espectro, la regulación queda definida según la nota "UN-85 Banda 2400 MHz a 2483,5 MHz" del CNAF [36, Pág 919] para el acceso inalámbrico a redes de comunicaciones electrónicas, así como para redes de área local, donde las condiciones de uso han de ser conforme a la Decisión ERC/DEC/(01)07 y la Recomendación CEPT ERC/REC 70-03. En tal caso, la potencia isotrópica radiada equivalente total será inferior a 100 mW (20 dBm) (PIRE).

En la banda de 2.4 GHz existen un total de 14 canales, que en el caso de Europa se hace uso de los trece primeros. El ancho de banda por canal es de

22 MHz con una separación entre canal de 5MHz, lo que produce un solapamiento de todos los canales con sus adyacentes, tal y como se puede ver en la Figura 2.7 y Figura 2.8.

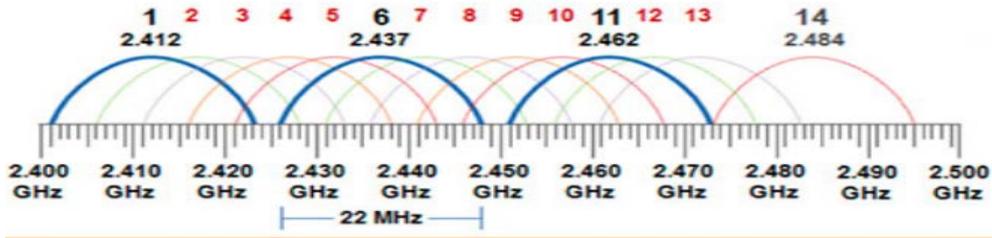


Figura 2.7: Canales en banda 2.4 GHz

Fuente: <http://www.visiontunera.icrt.cu/news/canales-wifi/>

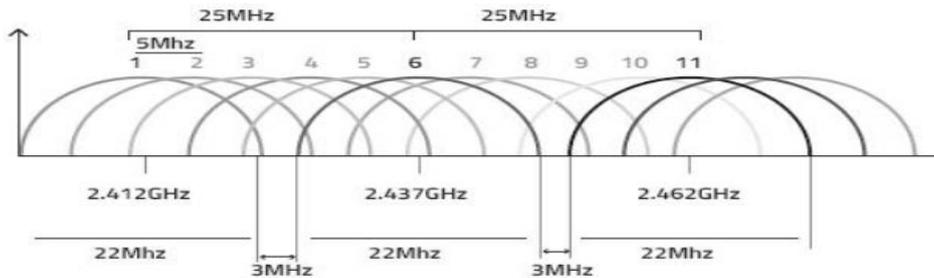


Figura 2.8: Canales no interferibles y anchos de banda en 2.4 GHz

Fuente: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702013000200001

En la Tabla 2.6 se puede ver un resumen de las frecuencias y su canal asociado en la banda de 2.4 GHz.

Canal	Frecuencia central (MHz)	Región - País			
		América/China	EMEA	Japón	Israel
1	2412	•	•	•	
2	2417	•	•	•	
3	2422	•	•	•	•
4	2427	•	•	•	•
5	2432	•	•	•	•
6	2437	•	•	•	•
7	2442	•	•	•	•
8	2447	•	•	•	•
9	2452	•	•	•	•
10	2457	•	•	•	
11	2462	•	•	•	
12	2467		•	•	
13	2472		•	•	
14	2484			•	

Anchura de canal: 22 MHz

EMEA: Europa, Medio Oriente y África

Tabla 2.6: Canales y frecuencias en banda de 2.4GHz

En lo que se refiere al uso de Wi-Fi en la banda de 5 GHz, las potencias permitidas varían en cada país, incluso dentro de la Comunidad Europea y son dependientes de diversos factores, como el uso en interiores, exteriores o la implantación de mecanismos de control de potencias.

En el Estado español, las condiciones de uso común de la banda de 5 GHz se concreta en la notas “UN-128 [36, Pág 937] y UN-143 [36, Pág 942] RLANs en 5GHz” del CNAF. Dicha nota recoge que las bandas de frecuencia indicadas a continuación podrán ser utilizadas en sistemas y redes de área local de altas prestaciones, de conformidad con las condiciones que se indican a continuación. Los equipos utilizados deberán disponer del correspondiente certificado de conformidad de cumplimiento con la norma EN 301 893 o especificación técnica equivalente. A continuación se detalla un resumen de las regulaciones establecidas en las notas UN-128 y UN-143 para la banda de 5GHz de uso común:

- Banda 5150-5350 MHz: De uso exclusivo en el interior de recintos. La potencia isotrópica radiada equivalente máxima será de 200 mW (PIRE), siendo la densidad máxima de PIRE media de 10mW/MHz en cualquier banda de 1MHz. Especificaciones de uso en nota UN-128.
- Banda 5250-5350 MHz: Adicionalmente, en esta banda el transmisor deberá emplear técnicas de control de potencia (TPC) que permitan como mínimo un factor de reducción de 3 dB de la potencia de salida. En caso de no usar estas técnicas, la potencia isotrópica radiada equivalente máxima deberá ser de 100 mW (PIRE). El resto de características técnicas han de ajustarse a las indicadas en la Decisión de la CEPT ECC/DEC/(04)08. Especificaciones de uso en nota UN-128.
- Banda 5470-5725 MHz: Uso para sistemas de acceso inalámbrico a redes de comunicaciones electrónicas, así como para redes de área local en el interior o exterior de recintos, y las características técnicas deben ajustarse a las indicadas en la Decisión de la CEPT ECC/DEC/(04)08. La potencia isotrópica radiada equivalente será inferior o igual a 1W (PIRE). En el caso de no hacer uso de técnicas TPC, la PIRE ha de ser de 500 mW. Especificaciones de uso en nota UN-128.
- Banda 5725-5875 MHz: Cubre la banda (libre) superior de 5GHz. Su principal ventaja es que no tiene invasión espectral por estándares 802.11 y su PIRE es de hasta 4W. Ha de usar duplexación TDD y canales de 10 o 20 MHz, así como técnicas de control de potencia y selección dinámica de frecuencias. Especificaciones de uso en nota UN-143.

En la Tabla 2.7 quedan resumidas las bandas de frecuencia en 5GHz, así como el canal utilizado.

	Canal	Frecuencia central (MHz)	Región ITU-R - País					
			Europa	América	Japón	Singapur	Taiwan	Asia
Europa Max. Pot 200 mW	36	5180	•	•	•	•		
	40	5200	•	•	•	•		
	44	5220	•	•	•	•		
	48	5240	•	•	•			
	52	5260	•	•	•			
	56	5280	•	•	•			
	60	5300	•	•	•			
	64	5320	•	•	•			
Europa Max. Pot 1 W	100	5500	•		•			
	104	5520	•		•			
	108	5540	•		•			
	112	5560	•		•			
	116	5580	•		•			
	120	5600	•		•			
	124	5620	•		•			
	128	5640	•		•			
	132	5660	•		•			
	136	5640	•		•			
	140	5700	•		•			
	149	5745		•		•	•	•
	153	5765		•		•	•	•
	157	5785		•		•	•	•
	161	5805		•		•	•	•
165	5825		•		•	•		

Anchura de canal: 20MHz

Tabla 2.7: Canales y frecuencias en banda de 5 GHz

Se debe de tener en consideración que la PIRE incluye tanto la potencia de emisión como la ganancia de la antena utilizada -en términos logarítmicos, $PIRE = \text{Potencia Radiada} + \text{Ganancia}$ - y la regulación establece las limitaciones de potencia en el orden de máxima radiación. Por tanto, en la práctica no es posible aumentar el alcance de la emisión utilizando antenas de más ganancia si se pretende respetar la legislación vigente.

En función de la PIRE estipulada por normativa a cada una de las bandas de uso común tratadas en este apartado se puede obtener, tal y como se mostrará más adelante, la distancia de seguridad entre un punto de emisión inalámbrico y la persona.

2.3.5 Estándares

Todos los estándares de la familia 802.11 operan dentro de las bandas de frecuencia ISM (Industrial, Scientific and Medical). Su aplicación es diversa, aunque se caracterizan por la posibilidad de utilizar frecuencias que no requieren de licenciamiento para poder operar. Esto los convierte en soluciones ideales para su uso generalizado

Cada uno de los estándares cuenta con sus propias características y se debe considerar que fueron evolutivos, es decir, se lanzaron en diferentes momentos. El primer estándar WLAN 802.11 aceptado fue 802.11b. Utilizó frecuencias en la banda ISM de 2,4 GHz, posibilitando velocidades de 11 Mbps haciendo uso de un esquema de modulación conocido como *Complementary Code Keying* (CCK). Además, entre sus características cabe mencionar que soporta *Direct-Sequence Spread Spectrum* (DSSS) desde la especificación 802.11 original.

Casi en paralelo al desarrollo de 802.11b se definió el estándar 802.11a, al que se dotó de una técnica de modulación diferente, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) y utiliza la banda ISM de 5 GHz. De los dos estándares, fue la variante 802.11b la que se hizo más popular. Esto se debió principalmente a que los chips para la banda inferior de 2.4 GHz eran más fáciles y baratos de fabricar.

Buscando aumentar las velocidades, otra norma, 802.11g, fue introducida y ratificada en junio de 2003. Utilizando la banda más popular de 2.4 GHz y OFDM, ofrece velocidades de 54 Mbps. Además ofrece compatibilidad con versiones anteriores de 802.11b. En enero de 2004, el IEEE anunció que había formado un nuevo comité para desarrollar un estándar de velocidad aún mayor bajo el estándar 802.11n. La industria llegó a un acuerdo sustancial sobre las características de 802.11n a principios de 2006.

En la tabla 2.8 se puede ver un resumen de los principales estándares 802.11, así como sus evoluciones.

802.11 network PHY standards								
802.11 protocol	Release date	Frequency	Bandwidth	Stream data rate	Allowable MIMO streams	Modulation	Approximate range	
		GHz	MHz	Mbit/s			Indoor	Outdoor
802.11-1997	Jun 1997	2.4	22	1, 2	N/A	DSSS, FHSS	20 m (66 ft)	100 m (330 ft)
a	Sep 1999	5	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	N/A	OFDM	35 m (115 ft)	120 m (390 ft)
		3.7						5000 m (16,000 ft)
b	Sep 1999	2.4	22	1, 2, 5.5, 11	N/A	DSSS	35 m (115 ft)	140 m (460 ft)
g	Jun 2003	2.4	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	N/A	OFDM	38 m (125 ft)	140 m (460 ft)
n	Oct 2009	2.4/5	20	Up to 288.8	4		70 m (230 ft)	250 m (820 ft)[8]
			40	Up to 600				
ac	Dec 2013	5	20	Up to 346.8	8	MIMO-OFDM	35 m (115 ft)[9]	
			40	Up to 800				
			80	Up to 1733.2				
			160	Up to 3466.8				
		0.054-0.79	6-8	Up to 568.9	4			
ad	Dec 2012	60	2,160	Up to 6,757 (6.7 Gbit/s)	N/A	OFDM, single carrier, low-power single carrier	3.3 m (11 ft)[12]	

802.11 Standard rollups							
802.11-2007	Mar 2007	2.4, 5		Up to 54		DSSS, OFDM	
802.11-2012	Mar 2012	2.4, 5		Up to 150		DSSS, OFDM	
802.11-2016	Mar 2016	2.4, 5, 60		Up to 866.7 or 6,757		DSSS, OFDM	

Tabla 2.8: Principales estándares y evolutivos de 802.11

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11

En el diseño de una red inalámbrica, y con el foco puesto en su capacidad, es necesario considerar la velocidad real (*throughput*) y no la de transmisión en el aire. La velocidad de transmisión en el aire incluye la información de usuario así como toda aquella información adicional para asegurar el intercambio fiable de información (protocolos, verificación errores, etc.), mientras que cuando hablamos de velocidad real es la velocidad de transferencia de datos que observa el usuario. Una manera de medir este último es monitorizando la velocidad de transmisión en el interface de red del equipo del usuario. En la Tabla 2.9 se puede ver, en la columna “Velocidad de datos típica”, los valores aproximados de throughput en los principales estándares 802.11.

Protocolo	Frecuencia	Velocidad de datos típica	Velocidad máxima	Alcance interior aproximado	Alcance exterior aproximado
802.11a	5 GHz	25 Mbps	54 Mbps	70 m	70 m
802.11b	2.4 GHz	6.5 Mbps	11 Mbps	100 m	200 m
802.11g	2.4 GHz	25 Mbps	54 Mbps	38 m	140 m
802.11n	2.4 GHz/5GHz	200 Mbps	600 Mbps	70 m	250 m
802.11ac	5 GHz		> 1 Gbps	70 m	250 m

Tabla 2.9: Resumen estándares habituales 802.11: Frecuencia, Velocidad, Alcance

2.4. WiMAX. IEEE 802.16

2.4.1. Introducción

Se puede considerar que WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), bajo el estándar IEEE 802.16, es la evolución de los conocidos sistemas de bucle local inalámbrico como LMDS. Hasta su aparición definitiva los fabricantes se aventuraron a poner en el mercado diferentes equipos que se denominaron pre-WiMAX, con implementaciones propietarias de cada uno de ellos, lo que hacía que tales equipos fuesen incompatibles entre sí.

Las soluciones basadas en 802.16 pueden cubrir tanto servicios de distribución como de interconexión de redes (*backhaul*). Por ello, se hace evidente la importancia del alcance del enlace, así como la calidad del mismo. En su comienzo se utilizaron frecuencias elevadas (10-66 GHz), las cuales hacían posible coberturas de varios kilómetros. El inconveniente surge como necesidad de disponer de visión directa (LOS) entre emisor y receptor. Para

escenarios sin visión directa (NLOS) se ha de usar frecuencias más bajas, entre los 2 GHz y los 11 GHz.

2.4.2. Componentes

A continuación se describen los tipos básicos de elementos que forman las redes 802.16:

- **Estación de usuario** (CPE, Customer Premises Equipment): Proporciona conectividad vía radio con la estación base (BS). Hace funciones de modulación en sentido CPE -> BS, demodulación en sentido CPE <- BS y control.
- **Estación base** (BS, Base Station): Proporciona conectividad con los CPE, además de proporcionar mecanismos de control y gestión. Incluye los elementos necesarios para conectarse con el sistema de distribución. En una estación base pueden coincidir distintos tipos de antenas, con las que atender diferentes necesidades y oferta de servicio para abonados.

En la Figura 2.9 se identifican estos dos elementos, así como las posibles configuraciones de conectividad entre ellas. De forma general, una red WiMAX posee una arquitectura similar a las redes celulares tradicionales ya que se basa en una distribución estratégica de una serie de emplazamientos en donde se ubicarán las estaciones base (BS). Cada estación base utiliza una configuración punto-multipunto (PMP) o punto-punto (PTP) para enlazar los equipos de los clientes. También existe la posibilidad de que las estaciones clientes se enlacen entre ellas en una configuración mallada.

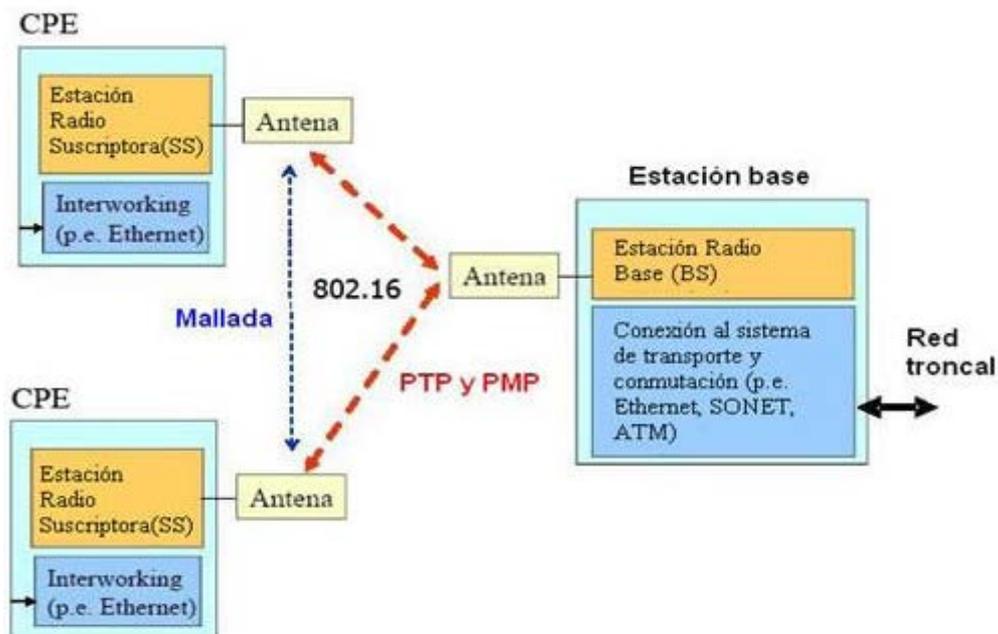


Figura 2.9: Componentes en red WiMAX
Fuente: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/WIMAX>

2.4.2. Estándares

El estándar 802.16 se finalizó en el año. Como ya se ha indicado, 802.16 como norma general ocupa el espectro de frecuencias desde los 2 GHz hasta los 11 GHz para lo que se conoce como comunicación de la última milla, o lo que es lo mismo desde la estación base hasta el usuario final. Por otro lado, hace uso de las frecuencias entre 11 GHz y los 60 GHz para las comunicaciones con línea de visión directa entre las estaciones base. Referente a este último espectro frecuencial, se hace uso de canales muy anchos (hasta 28 MHz), así como de modulaciones eficientes, lo que permite alcanzar capacidades teóricas de hasta 134 Mbps. En el año 2003 se publica un estándar complementario, el 802.16a, con uso de bandas de frecuencias más bajas, las cuales permiten una comunicación sin visibilidad directa. Esto permite mejorar la cobertura en el interior de edificios y habilita la posibilidad de establecer redes malladas (*mesh networks*), donde los mismos terminales actúan a la vez como repetidores.

Posteriormente surgió el estándar 802.16d, más conocido como 802.16-2004 (última revisión 802.16-2017) [21], el cuál unificó los anteriores, además de incorporar correcciones sobre los estándares originales. Se trata pues, del estándar de referencia para lo que es WiMAX actualmente, y para el cual empiezan a aparecer los primeros equipos. Con posterioridad se diseñó el estándar 802.16e, que incluía soporte para la movilidad con velocidades de hasta 120 km/h, así como soporte para la itinerancia (roaming), en la banda de frecuencias más inferior de las utilizadas por WiMAX. Este estándar ha pasado a ser conocido como 802.16e-2005. En la Figura 2.10 se muestra un resumen de los estándares mencionados.

	802.16	802.16-2004 (fijo)	802.16e (móvil)
Espectro	10 - 66 GHz	2 - 11 GHz	2 - 6 GHz
LOS/NLOS	LOS	NLOS	NLOS
Tasa de bits	32-134 Mbps	75 Mbps	Hasta 15 Mbps
Ancho de canal	28 MHz	20 MHz	5 MHz
Tipo de transmisión	Portadora única	Portadora única / 256OFDM 2048 OFDM	Portadora única / 256OFDM o escalable a 128 512 1024 2048 OFDM
Modulación	QPSK, 16QAM y 64 QAM	OFDM 256 portadoras QPSK, 16 QAM, 64QAM	Igual que 802.16d
Multiplexado	TDM/TDMA	TMD/TDMA/OFDM	TDM/TDMA/OFDMA
Duplexado	TDD y FDD	TDD y FDD	TDD y FDD
Movilidad	Fijo	Fijo	Móvil
Anchos de Banda	20, 25, 28 MHz	1.25 a 20 MHz	Hasta 20 MHz (flexibles)
Radio de celda típico	5 – 10 Km (alcance máx. de 50 Km)	2 - 5 Km	2 - 5 Km

Figura 2.10: Resumen de características de los principales estándares IEEE 802.16

Fuente: <https://masanmo7.wordpress.com/>

2.4.2.1 Estándar 802.16-2004

Se detalla en mayor detalle por ser en el que se ha de basar la solución del presente proyecto para implementar el enlace punto a punto de banda ancha. Como en el caso de Wi-Fi, WiMAX define sólo los niveles más bajos de la tecnología, es decir, el nivel físico y de enlace. Las diferencias que dan pie al mayor alcance de WiMAX y a su soporte de mecanismos de calidad de servicio, siempre con respecto al Wi-Fi, se encuentran en los orígenes y características de estos dos niveles.

En su capa física, WiMAX utiliza modulación OFDM, y en lo referente a su banda espectral, se le ha asignado bandas en 3,5 GHz y 5,8 GHz. Además, existen mejoras en el ámbito físico de WiMAX que introducen una mayor robustez ante errores, interferencias, etc. Estos mecanismos son básicamente de dos tipos:

- *Forward Error Correction*: La introducción de cierta redundancia en la información emitida, de manera que si hay pérdidas debidas, por ejemplo, a la meteorología, la información en recepción pueda ser reconstruida de forma correcta.
- *Adaptive Modulation*: Se trata de la capacidad de que la modulación utilizada se adapte de forma automática a las condiciones del canal. Esto hace que la velocidad de transmisión varíe en función de la distancia, la lluvia, etc. En el caso de WiMAX, el número de modulaciones alternativas, y por lo tanto de velocidades de transmisión, duplican a los aportados en Wi-Fi.

Por encima de estos mecanismos, WiMAX introduce un sistema de reparto de las señales de tal forma que ciertos flujos de datos tengan mayor prioridad y nivel de calidad que otros. Básicamente, antes de transmitir o de recibir información con un determinado nivel de calidad, cada estación tiene que solicitar a la estación base los recursos (anchura de canal, retardos máximos permisibles, etc.) que necesita para el servicio prestado en tal conexión. Recae sobre la estación base definir los mecanismos por los cuales se decide cuándo aceptar una nueva conexión y como distribuir los recursos, que naturalmente son limitados.

Otra característica destacada de WiMAX es que incorpora en el mismo estándar los mecanismos de seguridad necesarios para hacer de tal tecnología una solución interesante para los operadores de telecomunicaciones. Se puede decir que Wi-Fi en su estándar 802.11e incorporó muchos de los mecanismos que WiMAX implementa "de serie", y utiliza prácticamente los mismos mecanismos y algoritmos. Así pues, WiMAX proporciona:

- Encriptación de los datos utilizando el algoritmo AES, igual que WPA2 del 802.11i.
- Autenticación entre la estación base y el usuario basada en certificados digitales X.509, para evitar suplantaciones de personalidad por parte tanto de la estación base como del usuario.

- Autenticación de cada mensaje donde se intercambia una nueva clave mediante una firma digital, para evitar que los mismos puedan ser interceptados y modificados.
- Llaves de encriptación y autenticación que se renuevan periódicamente, para evitar ataques basados en almacenar y repetir mensajes válidos y para evitar que se puedan romper estas claves.

En cuanto a normativa y regulación del espectro aplica lo expuesto en el apartado 2.3.4.

2.4.3 Topologías en WiMAX

Se puede considerar que la topología de una red es la relación física y lógica entre los nodos que conforman dicha red. WiMAX puede ser configurado como Punto a Punto (PTP), Punto a Multipunto (PMP) o como Red Mallada. En la Figura 2.11 se muestra de forma general una topología WiMAX fija.

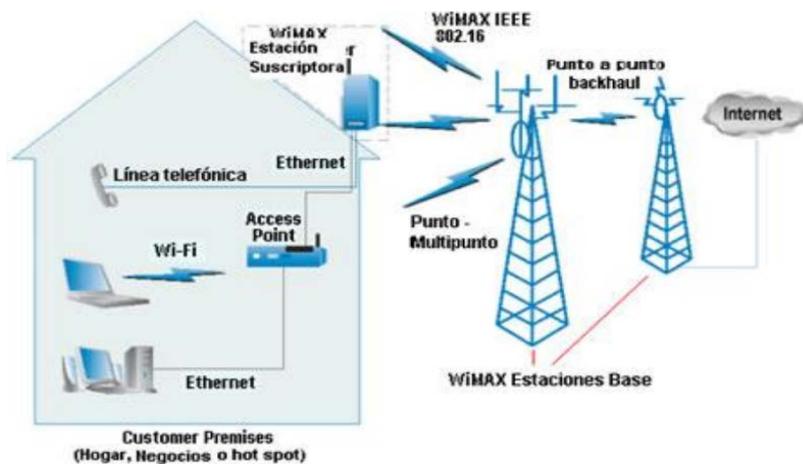


Figura 2.11: Topología WiMAX fijo

Fuente: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/WIMAX>

2.4.3.1 Punto a Punto

Comunicación exclusiva entre dos nodos. Consiste en transferir información de un dispositivo (punto) a otro punto (un único receptor) y de forma general lo forman la Estación Base (BS, Base Station) y la Estación Suscriptor (SS, Subscriber Station). La BS es la entidad que controla toda la comunicación y establece vínculos con la SS como se muestra en la Figura 2.12.

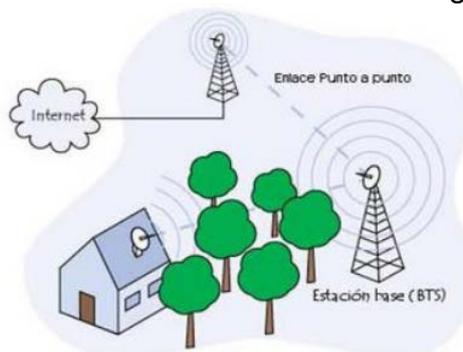


Figura 2.12: Topología Punto a Punto

Fuente: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/WIMAX>.

2.4.3.2 Punto a Multipunto

En una comunicación punto a multipunto (véase Figura 2.13) la comunicación ofrece varias rutas desde una única ubicación a múltiples puntos receptores. Está compuesta por una BS y múltiples SS. Esta topología es muy utilizada para el acceso de banda ancha de última milla para servicios inalámbricos de largo alcance, pudiendo ser utilizada tanto en medios LOS como en NLOS.

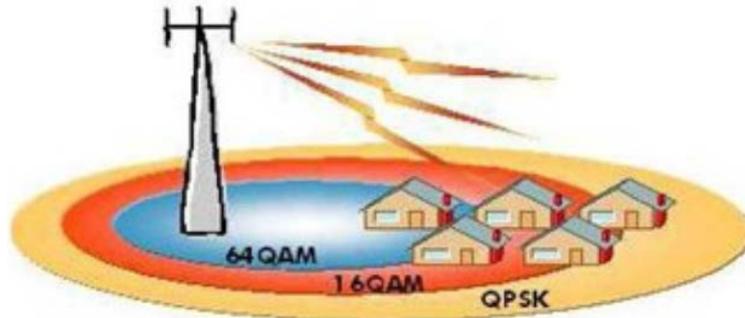


Figura 2.13: Topología Punto a Multipunto

Fuente: <http://slideplayer.es/slide/4159640/>

2.4.3.3 Mallada

Se puede considerar como una variante de la topología punto a multipunto en la cual una SS se puede conectar a una o más SS hasta alcanzar la BS. Se trata pues, de una topología muy utilizada cuando se necesita extender la cobertura en un área sin la necesidad de incrementar el número de estaciones base. Los datos viajan por caminos alternos para alcanzar su destino, tal y como se puede ver en la Figura 2.14.

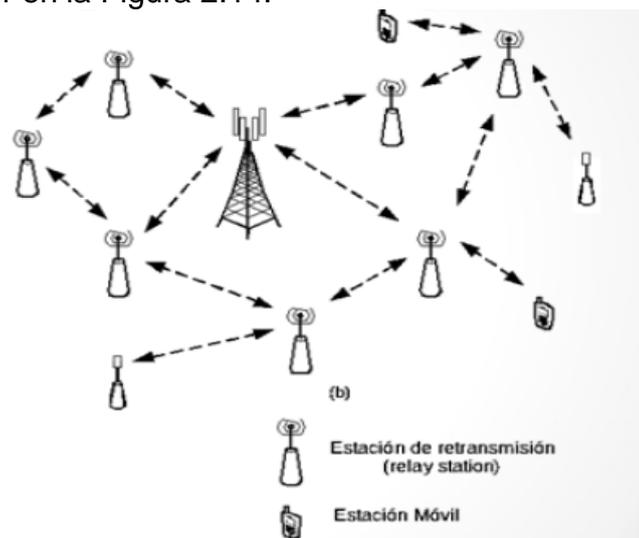


Figura 2.14: Topología de Red Mallada (Mesh Network)

Fuente: <http://slideplayer.es/slide/4655419/>

2.4. Otras tecnologías

En el presente apartado se hará una breve descripción de tecnologías que podrían ser válidas, al igual que WiMAX, para establecer el enlace de banda ancha a Internet. En el punto 2.5 se justificará la elección de las diferentes tecnologías a implementar en el presente proyecto.

2.4.1 Satélite

Proporciona conexión a Internet empleando como medio de enlace un satélite. Existen tres arquitecturas en función del canal de retorno desde el usuario a la red: Unidireccionales, Híbridos (canal de retorno a través de otra red, como por ejemplo ADSL) y bidireccionales. Las señales llegan por medio del “haz ascendente” desde el proveedor de servicios hacia el satélite (véase Figura 2.15 4-3) y desde el satélite por medio del “haz descendente” hacia la antena parabólica (3-2 en la misma ilustración).



Figura 2.15: Conexión a Internet vía Satélite

Fuente: [http://3.bp.blogspot.com/-](http://3.bp.blogspot.com/-PKefilYpneY/VamcVeb0CBI/AAAAAAAAAI4/u6l76l8W6lw/s1600/2.png)

[PKefilYpneY/VamcVeb0CBI/AAAAAAAAAI4/u6l76l8W6lw/s1600/2.png](http://3.bp.blogspot.com/-PKefilYpneY/VamcVeb0CBI/AAAAAAAAAI4/u6l76l8W6lw/s1600/2.png)

Las frecuencias del haz ascendente suelen ser mayores que las del descendente, y cuanto mayor sea la frecuencia de esta señal menor será la atenuación, por lo que se producirán menores pérdidas. A continuación se citan las bandas más comunes de frecuencia:

- **Banda L.** Rango de los 1530 MHz a los 2.7 GHz. Una de sus ventajas es la baja potencia necesaria para transmitir. Además, gracias a su gran longitud de onda puede traspasar montañas y edificios. Por el contrario, cuenta con poca capacidad para la transmisión de datos.
- **Banda Ku.** Rangos de frecuencias desde los 11.7 GHz hasta los 12.7 GHz para recepción y desde los 14 GHz hacia los 17.8 GHz para la transmisión. Como ventajas cuenta con la capacidad de sobrepasar la mayoría de los obstáculos y capacidad para transportar gran cantidad de datos.
- **Banda Ka.** Rango de frecuencias desde los 18-37 GHz; gracias a su mayor espectro de frecuencias son capaces de transportar mayores cantidades de datos que su antecesora la banda Ku. Tiene como mercado objetivo la banda ancha. Como desventaja tiene la necesidad de mayor potencia para el haz descendente debido a que es más sensible a interferencias medioambientales.

Para el acceso a Internet vía satélite las bandas utilizadas son Ku y Ka, por ejemplo, el Satélite KA-SAT (propiedad de Eutelsat) emplea la banda Ka.

2.4.2 3G/4G

En lo referente a las tecnologías de acceso móvil, en este apartado se hace a modo de descripción introductoria, las redes de tercera y cuarta generación

pueden competir en cuando a velocidad, y en algunos casos cobertura, con las tecnologías mencionadas en el presente documento.

3G es la abreviatura de tercera generación de transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil mediante UMTS, HSDPA, HSPUA, HSPA+. Tales tecnologías son las respuestas a la especificación IMT-2000 de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones). En este caso la tecnología 3G más actual es el estándar HSPA+, que pueden llegar a velocidades de los 336 Mbps para bajada y velocidades de los 69Mbps para subida.

LTE es un estándar creado por el *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* [24]. Los primeros trabajos para definir LTE fueron en 2005. El objetivo de este nuevo estándar era establecer el marco de evolución de los distintos estándares 3G existentes y superar sus limitaciones. Las principales características definidas en la revisión 6 de LTE eran una mejora de la latencia y velocidades de bajada de 300 Mbps y 75Mbps de subida.

En 2008 se creó un nuevo comité denominado IMT-Advanced [25] para determinar lo que debería ser la tecnología móvil de cuarta generación (4G). Entre los requisitos se fija velocidades de transmisión de 100 Mbit/s para una movilidad alta y de 1 Gbit/s para una movilidad baja.

Por lo expuesto en el párrafo anterior, LTE no se ha de considerar como un estándar de cuarta generación, ya que uno de los requisitos de estos estándares resultaba ser que debían de tener velocidades de bajada de un 1Gbps y el estándar LTE permite hasta 300 Mbps (para la Revisión 6).

En la actualidad, las organizaciones 3GPP y WiMAX Forum están definiendo las tecnologías de cuarta generación. 3GPP ha definido la tecnología LTE Advanced y el WiMAX Forum en la definición del estándar 802.16m.

2.5. Casos de éxito

A día de hoy, son multitud las implementaciones de acceso PtP basados en tecnología WiMAX para dotar de banda ancha a entornos rurales. A continuación se mencionan algunos proyectos donde se ha implementado de forma exitosa:

- Banda Ancha Inalámbrica Sierra Norte de Guadalajara. Solución conjunta entre el fabricante Albentia y el operador Telecom Castilla-La Mancha. Se usaron modelos ARBA Access basados en IEEE 802.16-2012. El despliegue dotó de una conexión básica a Internet de 2 Mbps a los usuarios de los núcleos urbanos de Campisábalos, Somolinos y Condemios de Abajo. El radio de cobertura es superior a los 20 Km.
- Red inalámbrica de acceso a Internet en escuelas rurales. Nariño, Colombia. Bajo el programa Conexión Total patrocinado por el Gobierno y con el fin de mejorar los procesos pedagógicos, se decide cambiar el sistema satelital en uso por tecnología WiMAX. Los motivos fundamentales de abordar el cambio fueron el elevado coste, escaso ancho de banda y elevada latencia del servicio por satélite. Se dotó las escuelas con un ancho de banda de 2 Mbps en bajada y 1 Mbps en subida.

En cuanto a Wi-Fi, también son varias las pruebas experimentales que se han realizado con tecnologías basadas en el estándar 802.11, utilizada en este proyecto para las redes de acceso, para cubrir zonas de larga distancia. Este tipo de soluciones son conocidas como Wild (WiFi Based Long Distance). Algunos ejemplos son:

- El proyecto Tecnología e Infraestructura para Regiones Emergentes (TIER) de la Universidad de California en Berkeley, en colaboración con Intel, utiliza una configuración Wi-Fi modificada para conectar el Hospital Aravind Eye con varias clínicas periféricas en el estado de Tamil Nadu, India. Las distancias oscilan entre cinco y más de quince kilómetros. Interconectan por videoconferencia a los profesionales con los pacientes. Otra red en Ghana vincula la Universidad de Ghana, el campus de Legon con sus campus remotos en la Escuela de Medicina de Korle bu y el campus de la Ciudad. Cuenta con enlace de hasta 80 km.
- El proyecto Tegola de la Universidad de Edimburgo está desarrollando nuevas tecnologías para llevar la banda ancha de alta velocidad y a un coste asequible a zonas rurales. Un anillo de 5 enlaces conecta Knoydart, la orilla N. de Loch Hourne, y una comunidad remota en Kilbeg con la red del Gaelic College en Skye. Se trata de enlaces con longitudes de 2,5 km a 19 km.

Todos estos ejemplos muestran la capacidad de la tecnología inalámbrica para dar solución de conectividad donde no es viable implementar soluciones cableadas.

2.6. Elección de tecnologías a implementar

Tanto 3G/4G como satélite son soluciones que requieren una cuota mensual por el servicio, que en el caso del primero oscila entre los 20€/mes de Vodafone hasta los 89,9€/mes de Masmovil. En el caso de satélite se tienen tarifas similares, por ejemplo el operador Quantis tiene opciones desde los 25,7€ a los 53,6€. Ambas soluciones requieren instalar equipamiento, en el caso de satélite ronda los 400€, o en régimen de alquiler por unos 7€/mes. En el caso de WiMAX, si se contrata con un operador también se requiere equipamiento y cuota mensua. En la solución WiMAX del presente proyecto, dicha cuota no estaría asociada al servicio WiMAX, sino a la ADSL por la que se daría servicio a Internet y que en este caso sería a coste cero por ser cedida por un vecino del pueblo sin perder el foco legal, tal y como se comentó en el apartado 2.3.4.

3G/4G es más sensible, que cualquiera de las otras dos opciones, a la saturación de las redes en momentos puntuales, de manera que afectaría a la calidad del servicio. En ambos casos, las ofertas suelen ir sujetas a un consumo de datos limitado y cuando es sobrepasado se baja la velocidad hasta el siguiente periodo de facturación. Otro factor importante es la latencia. En 3G/4G ésta suele ser baja, al igual que en WiMAX, pero en el caso de satélite puede llegar a ser de 1 segundo según indica el ingeniero Sergio Goterris a Teknautas [27].

En lo que se refiere a cobertura, la opción de satélite garantiza cobertura nacional, en el caso de 3g/4G en el municipio de Valdeavellano es Movistar la que más cobertura cubre en la zona. En la Figura 2.16 se muestra la cobertura de la red 3G de Movistar.

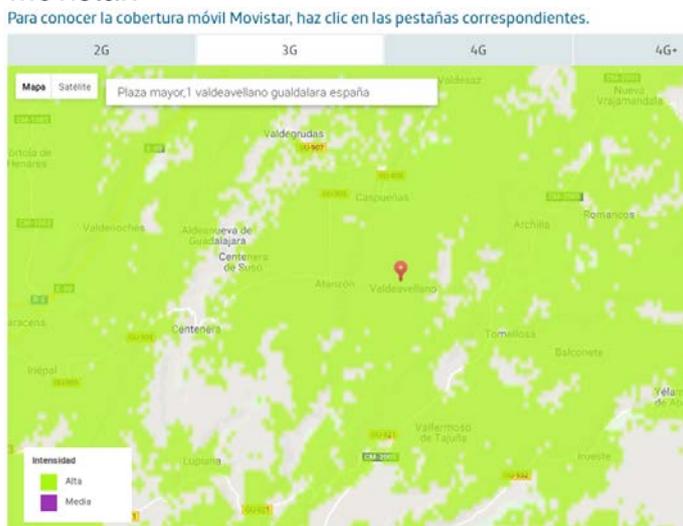
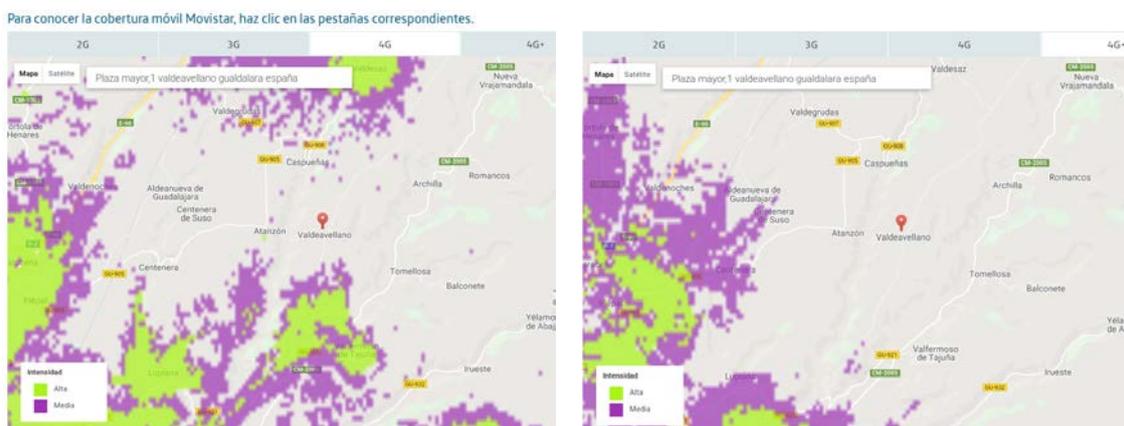


Figura 2.16: Cobertura Movistar 3G

Fuente: <http://www.movistar.es/particulares/coberturas/movil/4G/>

En la Figura 2.16 se puede apreciar que la cobertura es buena en todo el municipio de Valdeavellano, y en prácticamente el resto de los municipios colindantes. No es el caso para 4G y de 4G+, tal y como se puede ver en la Figura 2.17 (a) y Figura 2.17 (b) respectivamente.



(a) **Figura 2.17: Cobertura Movistar 4G (a) / 4G+ (b)**

Fuente: <http://www.movistar.es/particulares/coberturas/movil/4G/>

En conclusión, se opta por WiMAX ante la duda de la calidad de servicio de la red 3G/4G en la zona, y en el caso de satélite por su latencia. En cuanto al tema económico, la inversión es más alta que para cualquiera de las otras dos opciones, siendo el periodo de amortización de aproximadamente 11 años en comparación con la opción más cara (90 €) de cuota mensual indicada anteriormente y contando con la cesión de la línea ADSL. Por tanto, a día de hoy, la opción más óptima es implementar el enlace WiMAX que garantiza el ancho de banda en exclusividad para el municipio de Valdeavellano.

3. Caso de estudio

3.1. Análisis de requisitos

El presente proyecto tiene carácter teórico, no se trata de un caso real. Por tanto, no existe solicitud oficial por ninguno de los organismos públicos ni municipios mencionados a lo largo del trabajo.

Aunque ya se ha hecho mención a ciertos requisitos en lo referente a anchos de banda (véase punto 1.4), en este apartado se citan los requerimientos necesarios para dotar al municipio de Internet a través de su propia red:

- Se debe de dotar de cobertura Wi-Fi a todas las vías pública, así como plazas y parques que se encuentren en el interior del casco urbano.
- Las redes de acceso estarán constituidas por APs que soporten tecnología Wifi 802.11 b/g/n. Además, la de exterior ha de soportar itinerancia (roaming).
- Se ha de garantizar el ancho de banda fijado por normativa (véase 2.3.4.1) de 256 Kbps por usuario para servicios de navegación y correo.
- Estimación de concurrencia de usuarios: De lunes a viernes 15, fines de semana 40, periodos vacacionales 100.
- Se debe de garantizar la escalabilidad, alta disponibilidad y redundancia de la red en la medida de lo posible.
- El equipamiento instalado debe cumplir con la normativa vigente.
- Se ha de garantizar la seguridad de la red: comunicaciones cifradas y control de acceso de los usuarios.

3.2. Descripción del proyecto

Como ya se ha indicado con anterioridad, el presente proyecto consiste en dotar de conectividad a Internet a través de un enlace de banda ancha basado en tecnología WiMAX al municipio de Valdeavellano, así como extender dicha conectividad a través de la implementación de dos redes Wi-Fi, una de interior y otra de exterior. Los emplazamientos de la BSs WiMAX serán Valdeluz, municipio de Yebes (Guadalajara) y el Ayuntamiento de Valdeavellano. En este último es donde se ubicará el Centro de Datos (CPD) con el resto de elementos de red (router, switches), así como un servidor Linux que hará, en primera instancia, las funciones de Firewall (Iptables), Proxy (Squid) y Radius (Free Radius). Por tanto, el proyecto se divide en tres subproyectos:

- Red primaria: Enlace Punto a Punto con tecnología WiMAX, además de una conexión a Internet mediante ADSL, hasta que telefónica implemente fibra (FTTH, Fiber to The Home). Tras consultar por teléfono a un operario de Telefónica, este indica que la localidad de Valdeluz está en proyecto pero no hay fecha fijada.
- Red WiFi de interior: Ha de ser compatible con los estándares 802.11b,/g/n. Constará de puntos de acceso Wi-Fi que se conectarán

directamente a la red troncal Ethernet (802.3) mediante alimentación a través de tecnología POE (Power Over Ethernet), según 802.11af.

- Red WiFi mallada de exterior: Red de acceso WiFi con soporte para los estándares 802.11b/g/n/ac. Los APs se ubicarán en puntos públicos donde se disponga de suministro eléctrico o sea viable su instalación.

3.3. Estudio de viabilidad

Para determinar la viabilidad del proyecto y planificar el despliegue se consideran aspectos fundamentales como la población a la que va dirigida la solución y la orografía del terreno. Más adelante se analizará el tema relacionado con los costes.

- Población: Se determina el porcentaje aproximado de población al que va dirigida la solución, teniendo en consideración los posibles perfiles de usuarios y preferencias de los mismos. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE) [14], el censo (véase Figura 3.1) es de 107 vecinos. En realidad, la población habitual es de aproximadamente 40 vecinos, de los cuáles 15 son menores de 60 años, y serían los usuarios potenciales del servicio. La situación cambia los fines de semana y periodos vacacionales, donde la población puede ascender a los 100 usuarios y 500 usuarios respectivamente, pasando de 15 a 40 y a 100 respectivamente los usuarios potenciales.

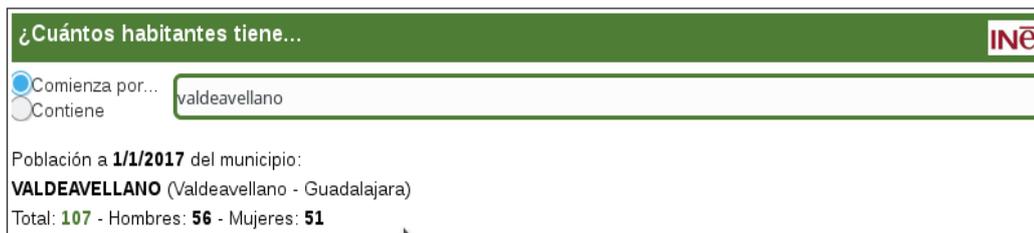


Figura 3.1: Censo en Valdeavellano

Fuente: INE

En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de la concurrencia máxima de usuarios estimada, los servicios a acceder y los rates necesarios. Tales datos se han de tener presente para el diseño de la capacidad de la red.

Descripción	Porcentaje	Usuarios	
Máxima población estimada	100%	500	
Máxima Concurrencia Estimada (MCE)	20%	100	
Uso en base al máximo de concurrencia			
Servicio	%	MCE	Rate estimado
Internet. Navegación y Correo	100%	100	256 Kbps
Intranet (navegación, chat, documentos: pdfs, docs, ...)	100%	100	10 Mbps
Juegos en red	25%	25	
Acceso a contenido multimedia	100%	100	

Tabla 3.1: Usuarios, Servicios y Rates

- En lo referente a la orografía, el municipio de Valdeavellano se encuentra en zona montañosa a una altura de 968,4 m. En el caso de Valdeluz la altura es de 922,3 m, lo que habrá que tener en consideración para establecer el radioenlace, además de la distancia, que en línea recta es de aproximadamente 14 Kms. En el caso del casco urbano, también hay diferentes alturas que podrán salvarse colocando los APs en puntos públicos estratégicos procurando obtener visión directa (LOS), siendo posible la necesidad de usar elementos de elevación en algún caso.

Para tener datos más reales, en lo que a throughput se refiere, se ha procedido a analizar durante 5 minutos con la herramienta iptraf el tráfico generado consultando el correo en Gmail mediante https, a la vez que se navega por varias páginas mediante http. El resultado se puede ver en la Figura 3.2.

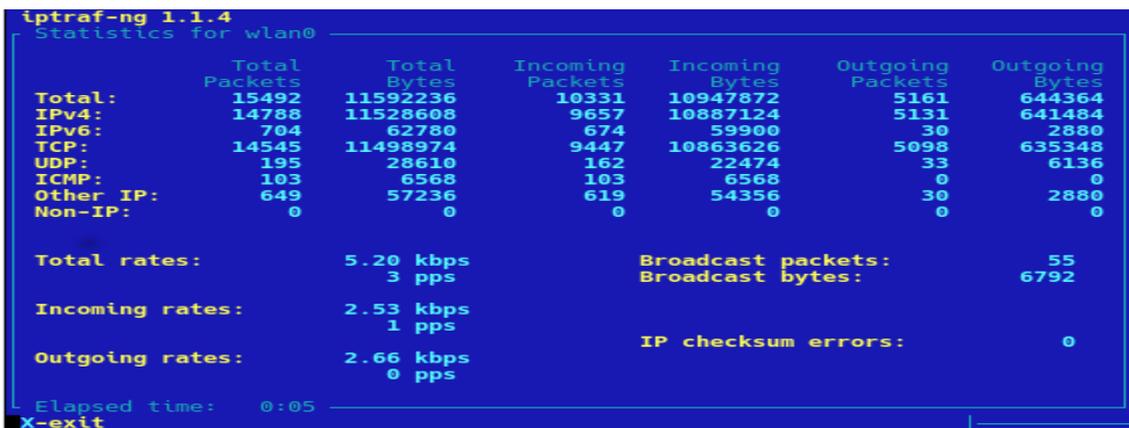


Figura 3.2: Tráfico generado por Gmail y navegación web

Considerando el dato “Total Bytes” y el tiempo de monitorización, el throughput medio es:

$$throughput = \frac{11592236 \text{ Bytes}}{300 \text{ seg}} = \frac{92737888 \text{ bits}}{300 \text{ seg}} = 309,13 \text{ bps} \approx 0,31 \text{ Mbps}$$

En la misma línea, se analiza el resultado para la visualización de un vídeo a 360p a través de Youtube. El resultado se puede ver en la Figura 3.3. En este caso el throughput medio es aproximadamente de 0,45. Mbps

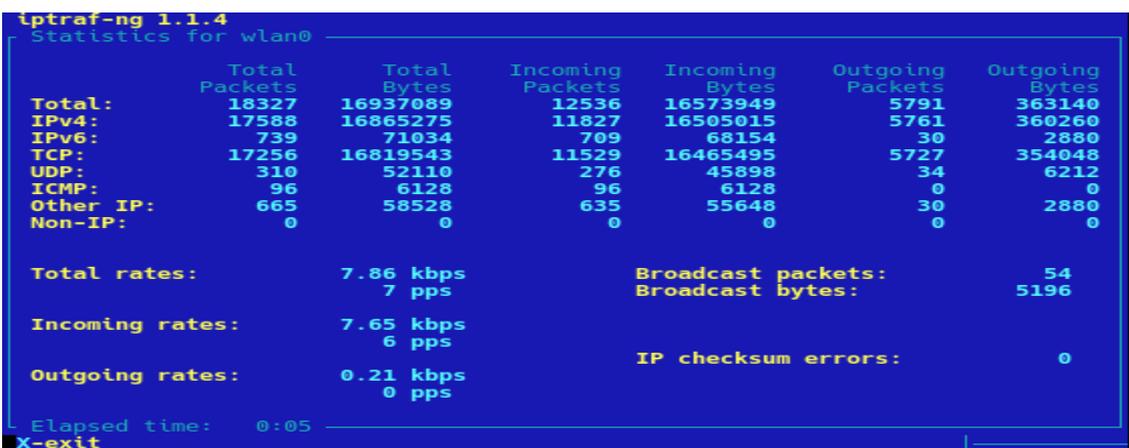


Figura 3.3: Tráfico generado por visualización de vídeo a 360p en Youtube

En base a los throughputs obtenidos, la conclusión es que el ancho de banda de 256 Kbps a proveer a los usuarios, aunque es algo inferior a los obtenidos, podría cubrir los requerimientos de navegación y correo, aunque en momentos puntuales se podrían producir retardos, provocando sensación de micro cortes. Considerando que la salida a Internet es mediante ADSL de 30 Mbps, el enlace tendría capacidad para aproximadamente 117 usuarios. En principio, se puede concluir que la solución es viable para el objetivo fijado de 100 usuarios concurrentes y cada uno con un ancho de banda de 256 Kbps. Para determinar la viabilidad absoluta queda analizar la capacidad de las redes WiFi, así como atenuaciones y calidad de señal tanto en el enlace PtP como en WiFi. Tales análisis se realizan en el siguiente apartado.

3.4. Estudio del radio enlace WiMAX

A lo largo del presente apartado se procede al estudio del enlace PtP WiMAX. En la Tabla 3.2 se puede ver un resumen de los datos obtenidos de los datasheet de la BS (Anexo 8.1.2) y de la antena (Anexo 8.1.1).

Enlace PtP WiMAX Valdeluz-Valdeavellano		
Datos Datasheet		
Datos	Parámetro	Valor
Distancia: 13,81 Km Frecuencia: 5420 MHz - 5725 MHz	Potencia BS	23 dBm
	Ganancia BS	34 dB
	Capacidad min/max	35 Mbps / 140 Mbps
	Sensibilidad Antena	-74 dBm ; -99 dBm
	Latencia	5 ms
	Atenuación cable y conectores	1 dBi

Tabla 3.2: Resumen de datos técnicos de la BS y la antena

3.4.1 Atenuación y Potencia recibida

Tomando como datos las frecuencias mínima y máxima, para obtener la atenuación en el mejor y peor de los casos respectivamente, según la legislación y la distancia (13,81 Km) estimada por Radio Mobile (véase Figura 3.9 en apartado 3.4.3) se procede a calcular la atenuación en el espacio libre siguiendo recomendación UIT-R P.525-2 del ITU [28].

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right); \lambda = \frac{c}{f}$$

Donde:

L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre

λ : longitud de onda (m)

v : velocidad (m/s)

f : frecuencia (Hz)

d : distancia (m)

Para la frecuencia de 5420 MHz:

$$\lambda = \left(\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5420 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \right) = 0,055 \text{ m} \quad L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 \cdot \pi 13,81 \cdot 10^3 \text{ m}}{0,055 \text{ m}} \right) = 129,98 \text{ dB}$$

Para la frecuencia de 5725 MHz:

$$\lambda = \left(\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5725 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \right) = 0,052 \text{ m} \quad L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 \cdot \pi 13,81 \cdot 10^3 \text{ m}}{0,052 \text{ m}} \right) = 130,47 \text{ dB}$$

Para la conexión de la BS con la antena se utiliza el cable coaxial HDF200 N-macho a N-hembra 2m, cuya pérdida (incluido los conectores) es de 0,5dB/m. Al ser su longitud de 2m la pérdida será de 1dB.

Considerando como atenuación total la suma de las atenuaciones en el espacio libre y la de las antenas, la potencia recibida será:

$$P_R = P_T + G_t + G_r - (L_T)$$

$$P_{R_max} = 23 \text{ dBm} + 34 \text{ dB} + 34 \text{ dB}_r - (129,98 \text{ dB} + 1 \text{ dB}_i) = -39,98 \text{ dBm}$$

$$P_{R_min} = 23 \text{ dBm} + 34 \text{ dB} + 34 \text{ dB}_r - (130,47 \text{ dB} + 1 \text{ dB}_i) = -40,47 \text{ dBm}$$

Donde:

P_R : Potencia recibida

P_T : Potencia del emisor

G_t : Ganancia del emisor

L_T : Atenuación total ($L_{bf} + L_{at} + L_{ar}$)

Según se puede ver en la Tabla 3.2, la sensibilidad de los dispositivos está entre los -74 dBm y los -99 dBm. Como la mínima potencia recibida es superior, los dispositivos seleccionados son válidos y, en teoría, el enlace podrá ser establecido.

3.4.2 Distancia de seguridad

En base al RD1066/2001 (véase Tabla 2.5 en apartado 2.3.4.1) la densidad de potencia máxima en la banda de 2 a 300 GHz a la que los usuarios pueden estar expuestos debe ser menor que 10 W/m^2 [29].

En base a los valores de densidad de potencia máxima, se calcula la llamada distancia de seguridad, que es la distancia mínima que debe existir entre el elemento radiante y las personas circundantes. La distancia de seguridad se calcula con la siguiente ecuación:

$$D_s = \sqrt{\frac{M \cdot P_{PIRE}}{4 \cdot \pi \cdot S_{max}}}$$

Dónde:

M : Factor de reflexión. Su valor es 4 si se considera el reflejo total de un rayo (combinación en fase), 2.56 valor típico (suma en potencia), y es 1 si no se considera reflexión. 4 es el valor más restrictivo.

P_{PIRE} : Producto de potencia máxima por ganancia isotrópica de la antena, en unidades naturales (W).

S_{max} : Densidad de potencia máxima permitida.

Considerando las PIRE máximas según normativa vigente, y considerando como factor de reflexión el peor de los casos (M=4) y el valor máximo de densidad de potencia máxima se obtienen las siguientes distancias:

Para PIRE = 0,1 W (máximo en banda de 2,4 GHz):

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1}{4 \cdot \pi \cdot 10}} = 5,64cm$$

Para PIRE=0,2W (máximo para interiores en banda de 5 GHz):

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,2}{4 \cdot \pi \cdot 10}} = 7,98cm$$

Para PIRE=1W (máximo en banda de 5 GHz):

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot 1}{4 \cdot \pi \cdot 10}} = 17,85cm$$

Se puede concluir que la ubicación de las antenas cumplirá con la distancia de seguridad, ya que se situarán a varios metros del suelo. Dicha distancia se concretará más adelante con la simulación en Radio Mobile. Al final del apartado, en la Tabla 3.3 se puede ver un resumen de los datos obtenidos.

3.4.3 Simulación del enlace punto a punto

A continuación se procede a simular el enlace mediante Radio Mobile. Primero se han obtenido con Google Earth las ubicaciones de los puntos que conformarán el radio enlace (véase Figura 3.4). Con la opción copiar, marcada en amarillo en la Figura 3.4, se pasan las coordenadas a Radio Mobile, para crear lo que denomina "Unidades" (véase Figuras 3.5 y 3.6). Como se puede ver las coordenadas aparecen en formato "grados, minutos, segundos" (DMS), que en formato "grados decimales" (DD) serían 40.66466, -2.969375 para Valdeavellano y 40.59344, -3.10370 para Valdeluz. El primer valor corresponde a la Latitud y el segundo a la Longitud.

A continuación, en Radio Mobile, se ha creado la red Valdeluz-Valdeavellano indicando en el apartado de "Parámetros" los siguientes valores: rango de frecuencias "5470-5725 MHz", polarización "horizontal", modo estadístico "difusión" (por tratarse de unidades estacionarias), pérdidas adicionales "bosque" y clima "continental templado". Como Topología se indica "Red de datos, "cluster (Nodo/Terminal)". En el apartado Sistemas, en base a los datasheet de la BS y de la antena (véase Tabla 3.2), se introducen los siguientes datos: Potencia de transmission "0,2W" (23dBi), ganancia de antena "34 dBi", y sensibilidad (se ha aplicado el valor más restrictivo) "-99 dBm".

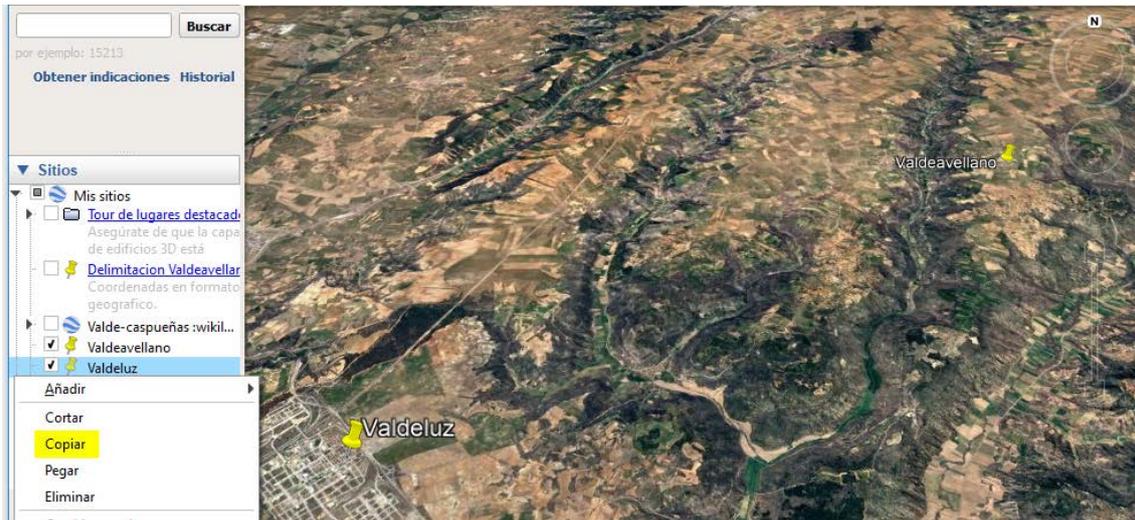


Figura 3.4: Ubicación puntos radio enlace en Google Earth

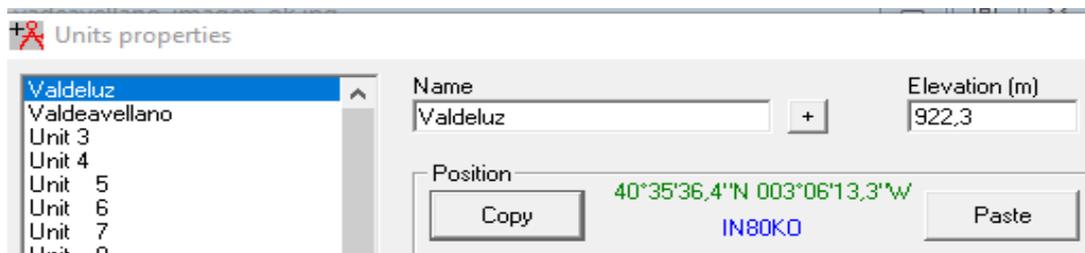


Figura 3.5: Creación unidad Valdeluz en Radio Mobile



Figura 3.6: Creación unidad Valdeavellano en Radio Mobile

Además, en el mismo apartado de Sistemas, se considera una pérdida de línea de 1dB, se selecciona como antena el modelo yagi, ya que su diagrama de radiación es muy similar al modelo HG4958DP-34D del fabricante L-com Global Connectivity, que es el seleccionado para el presente proyecto (véase Figura 3.7) y se indican como altura de antenas 20 m en Valdeluz y 25 m en Valdeavellano. Una vez definidos todos los parámetros, en la pestaña Miembros se ha de orientar de forma correcta las antenas entre los dos nodos que conforman el enlace.

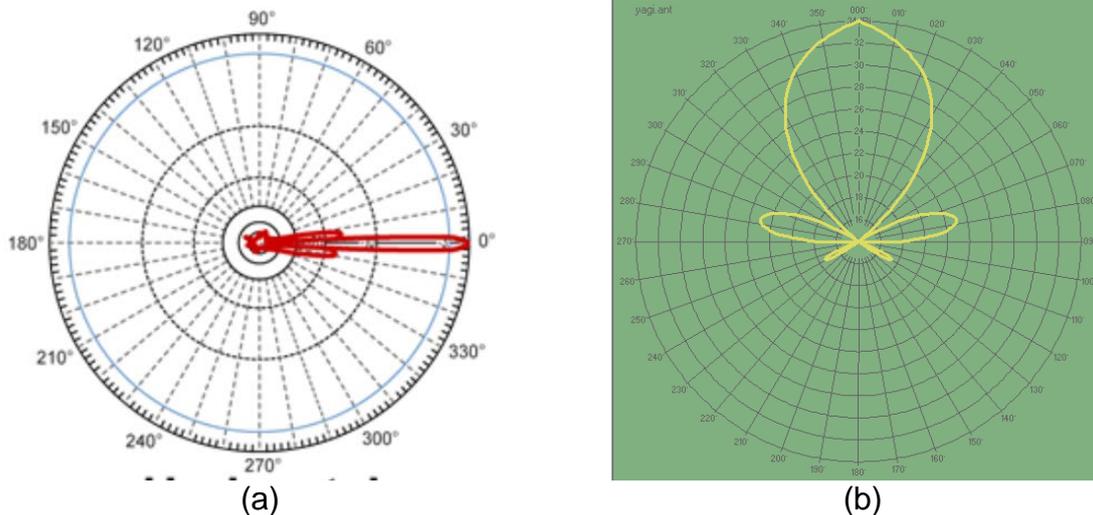


Figura 3.7: Diagrama de radiación. (a) HG4958DP-34D (b) Yagi de Radio Mobile

Con todos los datos introducidos, se puede realizar la simulación y obtener el mapa de la red, el cual muestra el enlace entre los dos puntos y la calidad del mismo. Tal y como se puede ver en la Figura 3.8, en este caso, el color verde del enlace indica que éste se establece de forma correcta, en caso contrario hubiese aparecido en rojo.

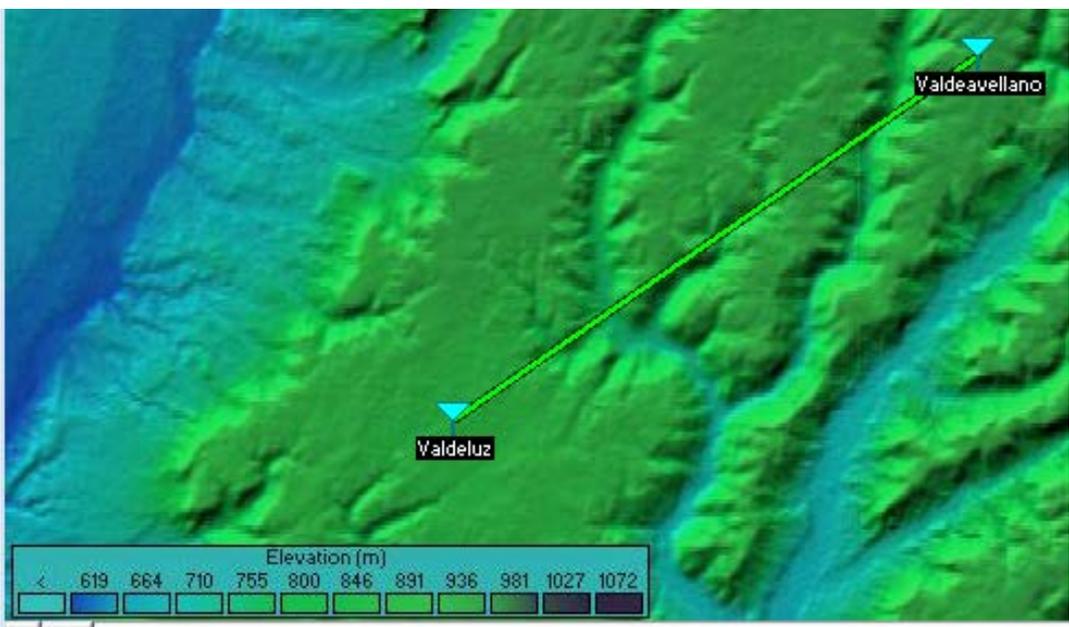


Figura 3.8: Radioenlace entre Valdeavellano y Valdeluz

Una vez comprobado que el enlace es viable, se puede analizar el detalle del mismo, para ello se pulsa el icono "Enlace Radio" de la barra de herramientas, obteniéndose el perfil del enlace, tal y como se muestra en la Figura 3.9.

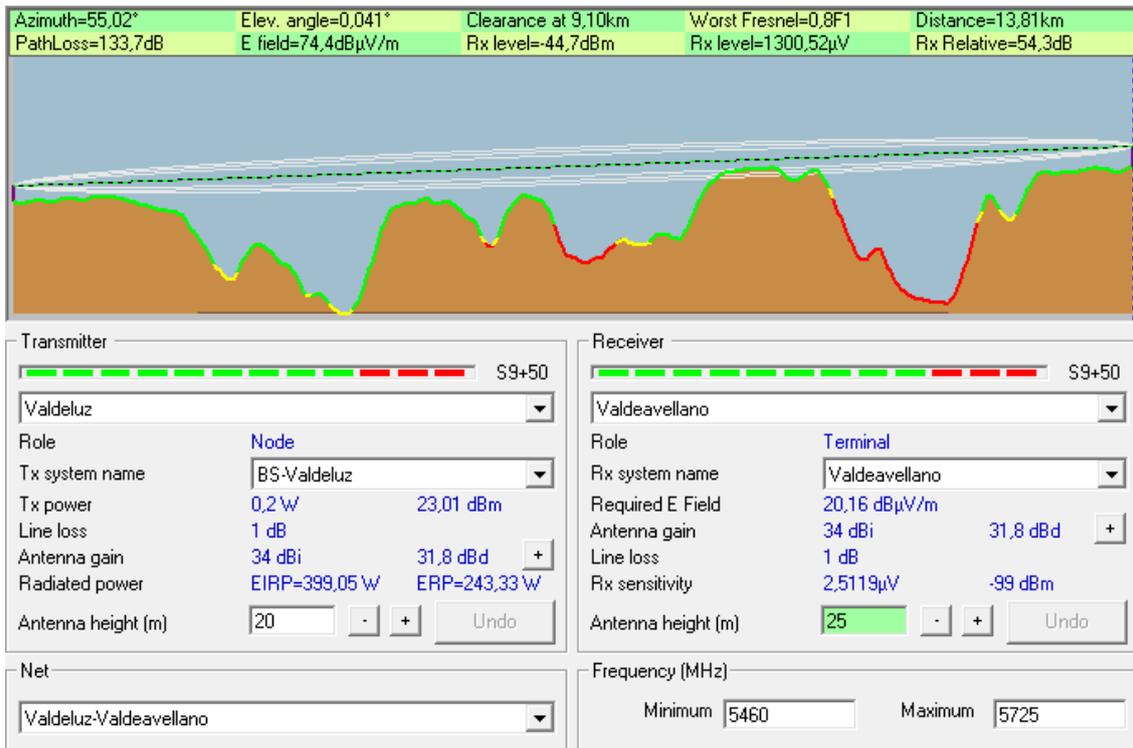


Figura 3.9: Perfil del enlace PtP Valdeavellano-Valdeluz

Como ya se ha indicado, la simulación refleja que el enlace es viable, con una potencia de recepción de -44,7 dBm, que es similar a la calculada en el apartado 3.4.1. Esta diferencia se puede deber a que, si se observa la Figura 3.9, aunque hay visión directa entre emisor y receptor, la primera zona de Fresnel no está completamente libre de obstáculos. También se puede ver que la distancia entre puntos es de 13,81 Km. En la Tabla 3.3 se presenta un resumen de los datos obtenidos mediante cálculo y simulación.

Enlace PtP WiMAX Valdeluz-Valdeavellano Datos Calculados y Simulado		
	Parametro	Valor
Datos	Pérdida en espacio libren en 5420 MHz	129,98 dB
Distancia: 13,81 Km Frecuencia: 5420 MHz - 5725 MHz Rate por usuario: 256 Kbps Altura antena Valdeluz: 20m Altura antena Valdeavellano: 25m	Pérdida en espacio libre en 5725 MHz	130,47 dB
	Potencia Rx Máxima Calculada/Simulada	-39,98 dBm
	Potencia Rx Mínima Calculada/Simulada	-40,47 dBm / -44,7 dBm
	Máx nº usuarios	136
	Distancia de seguridad	17,85 cm

Tabla 3.3: Enlace PtP WiMAX. Resumen de datos calculados y simulados

Por todo lo expuesto a lo largo del presente apartado, queda constatado que el enlace es viable y cubrirá las necesidades fijadas para dar conectividad a Internet a una concurrencia de 100 usuarios y con un rate por usuario de 256 Kbps.

3.4.4 Equipamiento

3.4.4.1 BS y CPE

Para implementar el radioenlace WiMAX se utilizará, la estación base modelo AXS-BS-450-N, el cual está diseñado bajo el estándar IEEE 802.16-2012, del fabricante español Alcentia. La compañía Alcentia fue pionera en la fabricación de equipamiento WiMAX en bandas libres de 5GHz, además de ser económicamente competitivos. Alcentia se fundó en 2004 y es miembro del WiMAX Forum desde 2006.

El equipo AXS-BS-450-N dispone de cuatro canales independientes de radio de hasta 10 MHz cada uno, lo que permite proporcionar hasta 140 Mbps netos agrupando cuatro sectores. Dispone de cuatro conectores Tipo N para la conexión de antenas externas. El equipo soporta, como opcional, alimentación PoE. En el Anexo 8.1.2 se puede consultar en detalle los datos técnicos.

El utilizar este dispositivo en ambos extremos del radio enlace hace que la infraestructura quede sobredimensionada, ya que en la actualidad la conexión a Internet está limitada a los 30 Mbps proporcionados por la línea ADSL, pero en el momento de poder contar con fibra (FTTH), el ancho de banda se podría aumentar haciendo uso de los tres canales restantes adquiriendo nuevas antenas.

3.4.4.2 Antena

En ambos extremos del radio enlace se hará uso de la antena modelo HG4958DP-34D del fabricante L-Com Global Connectivity. Se trata de una antena de plato sólido de doble banda y de alto rendimiento. Debido a su excelente rendimiento eléctrico y estabilidad mecánica, se puede utilizar en una amplia variedad de aplicaciones inalámbricas que requieran alto rendimiento en frecuencias de 4,9 GHz y 5 GHz (5,1 / 5,3 / 5,4 / 5,8 GHz).

Su diseño elimina la necesidad de diferentes antenas para cada frecuencia. Esto simplifica las instalaciones, ya que la misma antena se puede utilizar para una amplia gama de aplicaciones inalámbricas. Esta antena presenta 31 - 34 dBi de ganancia con un ancho de haz horizontal de 3.3 ° y un ancho de haz vertical de 3.3 °. Se puede consultar sus datos técnicos en el Anexo 8.1.1.

3.4.4.3 Mástiles

En la simulación realizada con Radio Mobile en el apartado 3.4.3, y tal como se muestra en la Figura 3.9, se puede ver que la altura de la antena en Valdeluz ha de ser de 20 m, y en el caso de Valdeavellano de 25 m.

En el caso de Valdeluz la instalación se realizará en la azotea de un edificio residencial de cinco plantas, lo que equivale aproximadamente a contar con una altura de partida de 12.5 m. Tal situación implica la necesidad de tener que aumentar la altura 7.5m más, para ello se hará uso de un mástil telescópico de aluminio como el modelo MBMT-8R de 8.9 metros comercializado por Mastil-Boom [30].



Figura 3.10: Mástil telescópico MBMT-8R

Fuente: Mastil-Boom [30]

En el caso de Valdeavellano la situación cambia, el mástil o torre de comunicaciones se ha de montar a pie de calle, en la fachada posterior del ayuntamiento. La opción escogida es un mástil del modelo que el fabricante Iberti [31] denomina de gran altura de fabricación estándar en aluminio. Para su instalación se requiere fijar una base como la mostrada en la Figura 3.11(b).



(a)



(b)

Figura 3.11: Mástil Iberti de 25m (a) y base (b)

Fuente: Iberti [31]

La elección de este mástil frente a otras soluciones, como una torre, se fundamenta en el coste. No obstante, la viabilidad de este mástil para su uso en comunicaciones no ha podido ser verificada a la entrega del presente trabajo, por lo que si el fabricante indicase su inviabilidad para tal uso, la solución pasaría por un modelo de los denominados “personalizados” por Iberti o una torre, con el incremento de coste que supondría.

3.5. Estudio de la red Wi-Fi de interior

En la Figura 3.12 se puede ver el plano de la planta que se ha de dotar con cobertura Wi-Fi. El habitáculo marcado en verde corresponde al CPD, donde se alojará todo el equipamiento: router, switches, servidor Linux y controlador Wi-Fi. Las salas de enfermería, médico y equipo de gobierno accederán a través del punto de acceso APIp1, reservado en exclusividad para uso profesional, bajo el SSID “PRO” (uso profesionales), el resto de salas tendrán conectividad a través de los otros cinco APs (se detalla más adelante) bajo el SSID “USU” (acceso público).

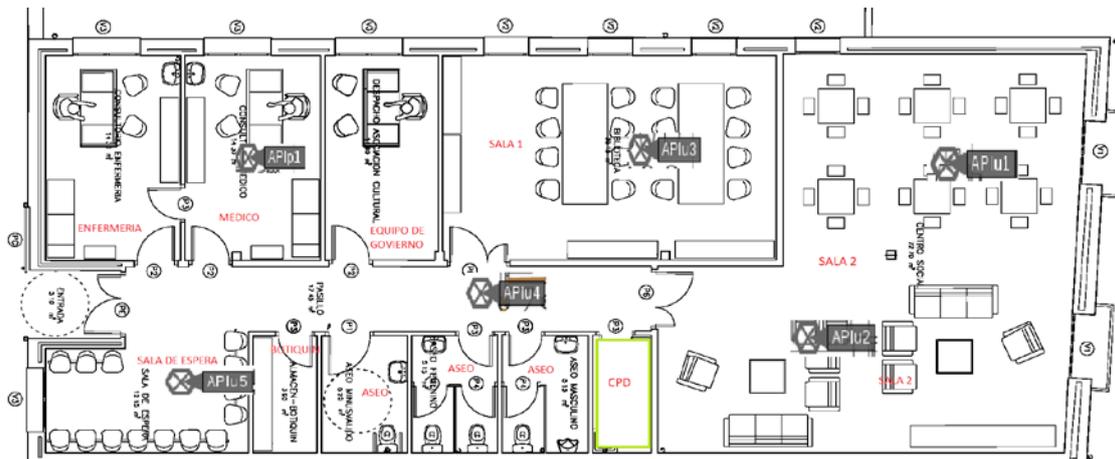


Figura 3.12: Plano del Ayuntamiento

Para el análisis de la red Wi-Fi de interior se hace uso de los datos proporcionados en el datasheet del AP (Anexo 8.2.1). En la Tabla 3.4 se puede ver un resumen de los mismos, así como de los demás datos necesarios para abordar el estudio. Al final del apartado 3.5.2, en la Tabla 3.5 se presenta un resumen con los resultados obtenidos.

Red Wi-Fi interior. Datos para estudio.			
Parámetro		Valor	
		Frecuencia: 2.4 GHz	Frecuencia: 5GHz
AP Cisco Aironet 1815J	Potencia TX	20 dBm	
	Ganancia	2 dBi	4 dBi
	Sensibilidad	-72 dBm ; -93dBm	-60 dBm ; -93dBm
	Máximo nº clientes	400	
	Ratio Min/Max 802.11n	7.2 Mbps / 144.44 Mbps	
	Ratio Min/Max 802.11ac	6.5 Mbps/866,7 Mbps	
Cliente ACER AS3810TZ	Potencia TX cliente	14 dBm	
	Ganancia	2 dBi	
	Sensibilidad	-66 dBm	
Común	Atenuación pladur	2 dB	

Tabla 3.4: Red Wi-Fi interior. Datos para estudio.

3.5.1 Atenuación, Potencia y Distancia de seguridad

A continuación y en base a lo ya expuesto en el apartado 3.4.1 para el cálculo de la atenuación y potencia recibida y en 3.4.2 para la distancia de seguridad, se procede a sus cálculos aplicando las condiciones particulares del entorno de esta red.

En el caso de la atenuación, hay que añadir las atenuaciones producidas por los propios elementos de la construcción como suelos, paredes, ventanas o puertas. Para el cálculo se considerará el peor de los casos, en el que el usuario esté más alejado del AP y la señal tenga que atravesar un tabique. Este podría ser el caso de un usuario situado en la esquina superior derecha

de la sala 1 e intentase conectar al AP APlu1. En este caso la distancia entre ambos sería la hipotenusa formada por la altura de APlu1 y el usuario, considerando que el AP está instalado en el techo a una altura de 2,5m y el dispositivo del usuario está a 0,5m del suelo, se obtiene la siguiente distancia:

$$d = \sqrt{10^2 + 2^2} = 10,44m$$

Para el cálculo se considera que los usuarios se conectan usando el estándar 802.11n y se considera el caso de las frecuencias más altas, ya que es donde mayor atenuación se produce, en los rangos de 2.4GHz y 5GHz. También hay que tener en cuenta que una pared de pladur implica un factor de atenuación de valor 2, y en este caso la señal tendrá que atravesar uno. Además se han de considerar las características del AP y del dispositivo cliente. En el caso del AP, de su datasheet (véase Anexo 8.2.1) se obtiene que, tanto para la banda de 2.4 GHz como la de 5GHz, la potencia de transmisión es 20 dBm y la sensibilidad está entre los -72 dBm y los -93 dBm. En el caso de la ganancia, para 2.4 GHz es de 2 dBi y para la banda de los 5 GHz es 4 dBi. En lo referente al dispositivo cliente, como ejemplo se ha cogido un portátil ACER ASPIRE AS3810TZ, cuya potencia de transmisión es 14dBm, su ganancia es de 2dBi y la sensibilidad es de -66 dBm.

Para el cálculo de la atenuación se utiliza el modelo COST 231 de segundo orden, que incluye las pérdidas por atravesar paredes y techos. Teniendo en consideración todos estos datos, las atenuaciones y potencias recibidas son:

$$\lambda_{2,4GHz} = \left(\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2483,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \right) = 0,12m \quad L_{bf_2,4GHz} = 20 \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 10,44m}{0,12m} \right) = 60,77dB$$

$$\lambda_{5GHz} = \left(\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5725 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \right) = 0,052m \quad L_{bf_5GHz} = 20 \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 10,44m}{0,052m} \right) = 68,04dB$$

$$P_{R-cliente_2,4GHz} = 20dBm + 2dBi + 2dBi - (60,77dB + 2dB) = -38,77dBm$$

$$P_{R-cliente_5GHz} = 20dBm + 4dBi + 2dBi - (68,04dB + 2dB) = -44,04dBm$$

$$P_{R-AP_2,4GHz} = 14dBm + 2dBi + 2dBi - (60,77dB + 2dB) = -44,77dBm$$

$$P_{R-AP_5GHz} = 14dBm + 2dBi + 4dBi - (68,04dB + 2dB) = -50,04dBm$$

De los resultados obtenidos se puede concluir que al ser las potencias recibidas mayores que las sensibilidades, la conexión en ambos sentidos será viable pudiendo hacer uso del ratio teórico que indica el datasheet del AP para 802.11n, que es de 144,4 Mbps en 2,4GHz usando un canal de 20 MHz y un intervalo de guarda de 400 ns.

Por lo expuesto, y considerando que el ancho de banda para el acceso a Internet ha de ser de 256 Kbps, se puede concluir que un solo AP tiene una capacidad teórica para aproximadamente 564 usuarios, aunque en el datasheet se indica un máximo de 200 clientes por antena, lo que hace que el máximo sean 400 clientes. Se cuentan con 5 APs para uso público, lo que significa que

la red Wi-Fi de interior queda sobredimensionada para cubrir el servicio requerido de navegación y correo. No obstante, hay que recordar que esta previsión queda limitada por los 35 Mbps que ofrece el enlace punto a punto y más aún, por los 30 Mbps de la actual ADSL.

Por otro lado, y con el foco en poder hacer uso de servicios internos (intranet, ficheros, impresión, juegos, etc) y considerando suficiente un throughput por usuario de 10 Mbps, podrá dar servicio a 72 usuarios.

En lo referente a la distancia de seguridad, en base a los cálculos obtenidos en el apartado 3.4.2, se puede concluir con que los APs cumplen, ya que su ubicación será en los techos y estos tiene una altura de 2,5 m, lo que permite mantener la distancia de 17,85 cm, que es la mayor distancia obtenida por cálculos para la banda de 5GHz y 1W de potencia de transmisión), entre los APs y los usuarios.

3.5.2 Simulación de la red

A lo largo de este apartado se aborda el estudio de la red mediante simulación. Para ello se utiliza la aplicación en línea HiveManager NG [32], con licencia de prueba gratuita durante 30 días, del fabricante Aerohive. Aunque se trata de una versión de prueba, es totalmente funcional. En primera instancia se iba a haber hecho uso del software de prueba por 15 días de Ekahu, pero al contrario que HiveManager NG, se trata de una opción inviable, ya que sus limitaciones como acotar a 20 minutos su uso o poder guardar el trabajo realizado hacía imposible su uso para abordar el presente proyecto.

No obstante, cabe indicar que HiveManager NG solo permite el uso de productos de Aerohive, por lo que para las simulaciones se han elegido APs con las mismas características que los elegidos para este proyecto y que se detallarán en el siguiente apartado para el caso de la Wi-Fi de interior y en el 3.6.1 para la Wi-Fi externa. Para el caso de la Wi-Fi de interior se ha usado el modelo AP250 [33] y para la de exterior el modelo AP1130 [34].

Una vez creada una cuenta para acceder a la aplicación [32], lo primero es crear lo que denominan “Global View” y para ello es necesario definir el entorno y subir el plano sobre el que hacer la simulación.

Una vez definido el entorno y subido el plano se selecciona el modelo de AP con el que realizar la simulación y se tiene la opción de ubicarlos de forma manual o que sea el simulador el que lo elija. En este caso se optó por la ubicación automática, aunque a posteriori se hizo leves modificaciones de posición de forma manual.

Sobre el mapa se marca el perímetro, así como tabiques y puertas. A continuación se indica en cada AP la potencia de emisión y asignación automática de canal. Con todo esto, ya se puede obtener los mapas de calor en los que se puede ver los niveles de cobertura en cada zona del mapa. En la Figura 3.13a y 3.13b se puede ver los mapas de calor indicativos de la intensidad de señal recibida (RSSI, Received Signal Strength Indication) para 2.4 GHz y 5 GHz respectivamente.

RSSI muestra la intensidad de las señales de radio de los APs. La barra de color indica la intensidad de las señales, siendo el rojo el más fuerte y el azul claro el más débil.

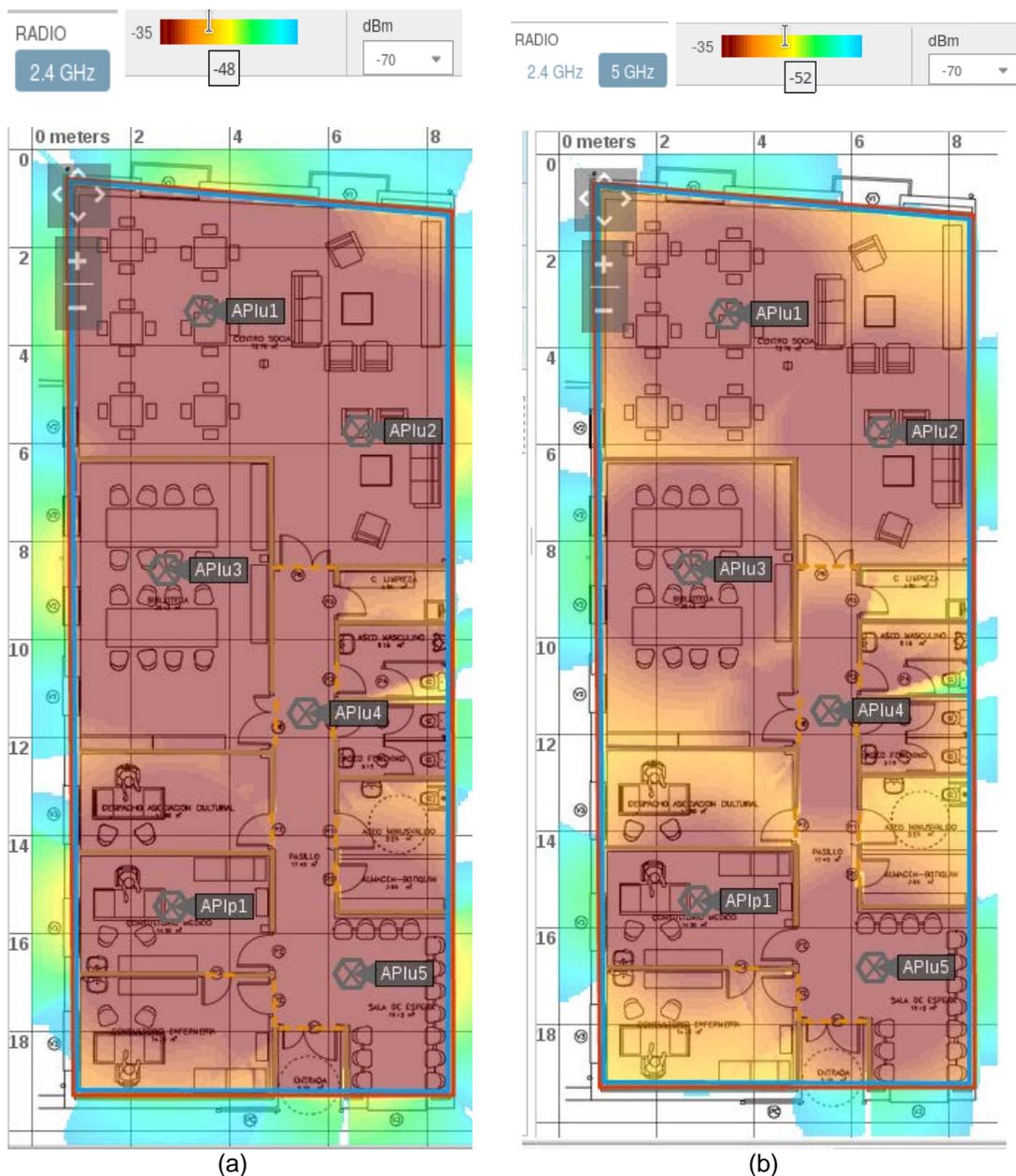


Figura 3.13: RSSI Heat Map

Cuando aumenta el umbral para la intensidad de la señal hacia -40 dBm, la barra de color cambia para mostrar solo los colores que representan los niveles de intensidad de la señal lo suficientemente fuertes como para captar clientes en o por encima de ese umbral RSSI. Cuando se baja el umbral para la intensidad de la señal más cercana a -90 dBm, la barra de color muestra más colores que indican más niveles de intensidad de señal a los que los clientes pueden conectarse.

En este caso, para las zonas de menor cobertura, se puede ver que para el caso de 2.4 GHz RSSI toma un valor aproximado de -48dBm y para 5 GHz de aproximadamente -52dBm. Se puede concluir que en ambos casos la señal es más que suficiente para poder llegar a los ratios teóricos indicados en el datasheet, que como ya se comentó en el apartado anterior, para 802.11n es de 144 Mbps.

A continuación, en la Figura 3.14 se muestra la relación señal/ruido (SNR), que es la diferencia entre el RSSI y el nivel de ruido en el entorno de RF. Una SNR alta significa que la diferencia entre la señal recibida y el nivel de ruido es alta, y por tanto, la posibilidad de interferencia es leve. Por el contrario, una SNR baja significa que la señal recibida está más cerca del nivel de ruido y aumenta la posibilidad de interferencia. En general, cuanto mayor es la SNR, mayores son las velocidades de datos, y mejor es la calidad de un enlace inalámbrico en esa área. Para un buen rendimiento inalámbrico, la SNR debe ser de al menos 20 dB y preferiblemente de al menos 25 dB.

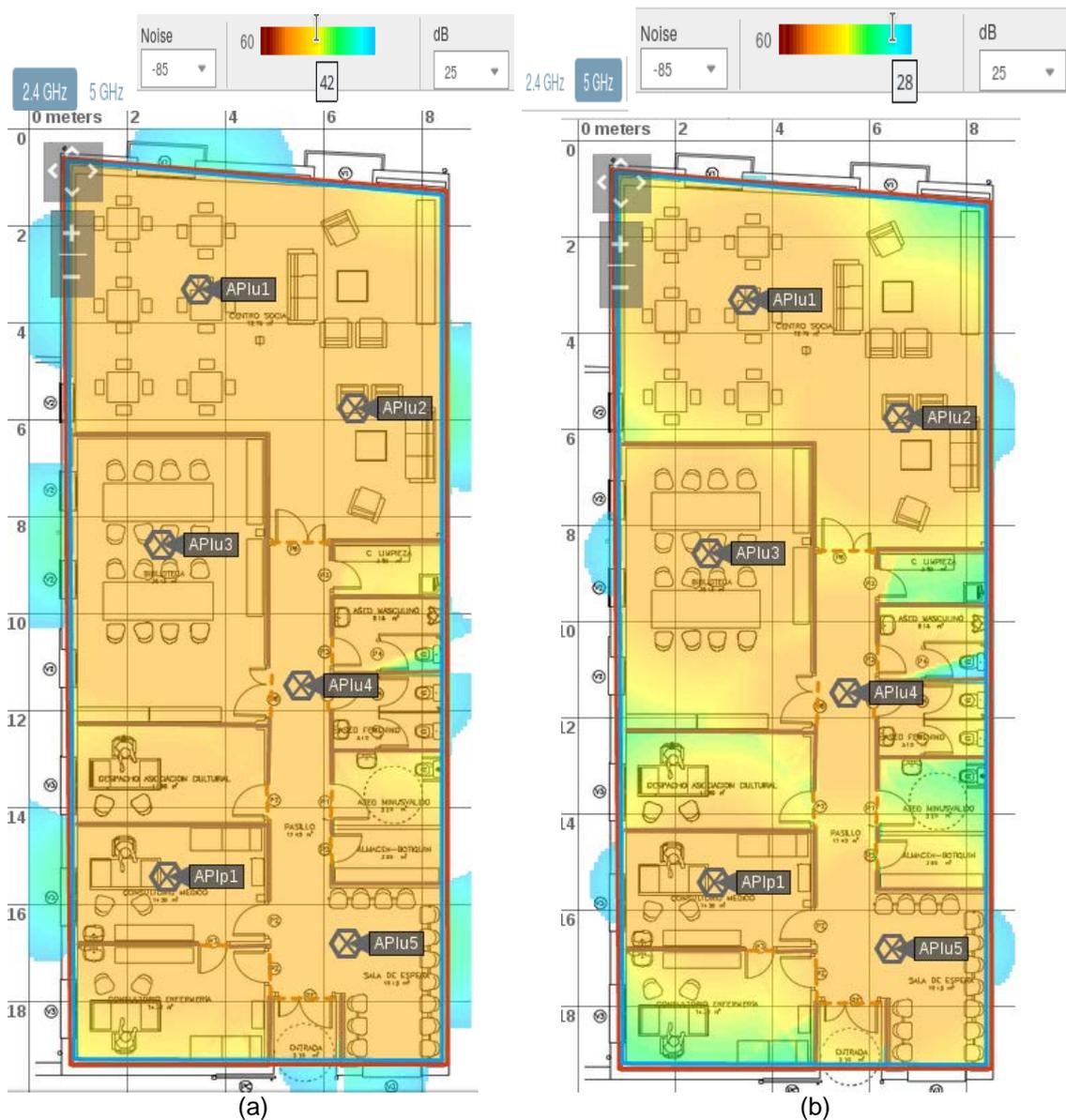


Figura 3.14: SNR Heat Map

canales en ninguna de las dos bandas, lo que reduce el riesgo de interferencia. No obstante, hubiese sido más óptimo para garantizar el no solapamiento el uso de los canales 1, 6 y 11 (véanse Figuras 2.7 y 2.8 en apartado 2.3.4.2).

En la tabla 3.5 se presenta un resumen con los datos obtenidos mediante cálculos y los obtenidos mediante simulación.

Red Wi-Fi interior. Cálculos teóricos.		
Parametro	Valor	
	Frecuencia 2.4 GHz	Frecuencia 5 GHz
Distancia AP-cliente	10,44 m	
Pérdida en espacio libre	60,77 dB	68,04 dB
Potencia Rx Cliente	-38,77 dBm	-44,04 dB
Potencia Rx AP: Calculado / Simulado	-44,77 dBm / -48 dBm	-50,04 dBm / -52 dBm
Distancia seguridad	5,64 cm	7,98 cm
*Ratio Internet / Nº máx clientes por AP / Nº máx clientes para acceso a Internet	256 Kbps / 564 / 117	
*Ratio Intranet / Max cli/AP / Max cli/red (5APs)	10 Mbps / 14 / 72	

*Se considera como Ratio teórico 144.4 Mbps. Según datasheet este puede variar desde los 7.2 Mbps a los 866.7 Mbps

Tabla 3.5: Red Wi-Fi interior. Resumen de datos calculados y simulados

Por todo lo expuesto a lo largo del presente apartado, queda constatado que la red propuesta tiene capacidad para cubrir las necesidades de acceso a Internet, ya que un solo AP podría dar servicio a 564 usuarios teóricos (en realidad se limita a 400 el máximo de clientes conectados) garantizando un rate de 256 Kbps a cada uno de ellos. No obstante, como ya se ha indicado, el límite de usuarios lo fija el enlace WiMAX a 117. Además, garantiza conectividad a 72 usuarios con un ratio de 10 Mbps para acceso a servicios internos como Intranet, Ficheros, Impresión o Juegos.

3.5.3 Equipamiento

Para implementar la red Wi-Fi interior se ha seleccionado el AP modelo Aironet 1815i del fabricante Cisco.



Figura 3.16: Cisco Aironet 1815i Access Point
Fuente: Cisco

Al soportar el estándar 802.11ac Wave 2, el 1815i ofrece una velocidad de datos de hasta 867 Mbps en la banda de 5 GHz. Esto mejora las velocidades de datos ofrecidas por el estándar 802.11n, también soportado por el

dispositivo. Se puede llegar a conseguir una velocidad total de datos de hasta 1 Gbps mediante la agregación de radio dual.

El 1815i permite el acceso por cable a través de un único puerto de autodetección RJ-45 10/100/1000. Es compatible con PoE 802.3af, por lo que se alimentará a través del cable de red evitando la instalación de puntos eléctricos. En lo referente a seguridad, cumple con los requerimientos de seguridad 802.1x, según se requería en el apartado 3.1. El resto de características se pueden consultar en el Anexo 8.2.1.

3.6. Estudio de la red Wi-Fi mallada de exterior

Se ha de dar cobertura al casco urbano, el cual cuenta con una superficie aproximada de 69500 m². Se estima que pueden llegar a conectar como máximo 100 usuarios de forma concurrente, aunque en realidad esta situación solo se podría dar dentro de periodos vacacionales y rara vez se alcanzaría tal concurrencia, siendo lo habitual un máximo de 20 usuarios. La capacidad de la infraestructura diseñada ha de proveer 256Kbps por usuario para cubrir el objetivo de navegación y correo. La infraestructura contará con 13 APs, de los cuales APER1 y APER2 harán la función de Root Access Point (RAP) y el resto de Mesh Access Point (MAP), véase Figura 3.28.

En lo referente al análisis teórico, no se considera necesario repetir cálculos para la atenuación, potencia y distancia de seguridad, ya que en base a los resultados obtenidos en 3.5.2 y los datos mostrados en la Tabla 3.5 se puede concluir que en este caso al ser mayor las distancias entre AP y cliente, así como también lo son la potencia de transmisión y la ganancia de los APs, la atenuación y potencia de recepción variará. En cuanto a las distancias de seguridad, al aumentar la separación entre AP y usuarios es evidente que se cumple. No obstante, el que la red propuesta sea viable o no quedará constatado a través de las simulaciones mostradas en el siguiente bloque.

Red Wi-Fi exterior Datos Datasheet. AP Cisco Aironet 1542D		
Parámetro	Valor	
	Frecuencia: 2.4 GHz	Frecuencia: 5GHz
Potencia TX	27 dBm	25 dBm
Ganancia	8 dBi	9 dBi
Sensibilidad	-74 dBm ; -100 dBm	-60 dBm ; -93 dBm
Máximo nº clientes	400	
Ratio Min/Max 802.11n	6.5 Mbps / 300 Mbps	
Ratio Min/Max 802.11ac		6.5 Mbps/866,7 Mbps

Tabla 3.6: Red Wi-Fi exterior. Resumen datos técnicos.

En el caso de la capacidad de la red, sí se estima oportuno el estudio teórico de la velocidad de transmisión, por cómo funciona una red mallada, donde los RAP asumirán el tráfico de varios MAP. Bajo esta premisa, el peor de los casos sería que uno de los RAP asumiese el tráfico de los 11 MAPs. En tal caso y considerando la máxima concurrencia (100 usuarios), en términos de

proporcionalidad, cada AP asumiría conexiones de 8,33 (redondeando 9) usuarios. Por tanto, se obtendría una velocidad (throughput teórico) por usuario:

$$V_{RAP} = \frac{V_{estimada_AP}}{n^{\circ}_{max_APs}} = \frac{144,4Mbps}{12} = 12,03Mbps$$

$$V_{usuario} = \frac{V_{RAP}}{n^{\circ}_{estimado_usuarios}} = \frac{12,03Mbps}{9} = 1,34Mbps$$

Para cumplir con el ratio requerido para salir a Internet, el número máximo de usuarios en el peor de los casos (un solo RAP) sería:

$$n^{\circ}_{estimado_usuarios} = \frac{V_{RAP}}{V_{usuario}} = \frac{12,03Mbps}{0,256Mbps} = 46/ AP$$

Se puede concluir que la red tendrá capacidad para cubrir el servicio propuesto, ya que para el peor de los casos se obtiene un ratio de 1,34 Mbps/usuario, cuando el requerido es de 256 Kbps, y un solo AP sería capaz de asumir la conexión de 100 usuarios de forma concurrente. El máximo de usuarios soportado por la red con un solo RAP y 11 MAPs sería de 552 usuarios. Al final del apartado 3.6.1, en la Tabla 3.8 se muestra un resumen con los datos obtenidos mediante simulación y cálculo.

3.6.1 Simulación de la red

Para comenzar con el estudio de la red Wi-Fi de acceso exterior, se comienza realizando una estimación de la ubicación de los APs haciendo uso de Google Earth, para posteriormente comprobar con Radio Mobile si los enlaces entre ellos son viables. En la Figura 3.17 se puede ver la ubicación de cada AP en Google Earth y en la Tabla 3.7 el detalle de ubicación para cada AP.

AP	Longitud	Latitud	Dirección
APE1r1	-2.969159718321125	40.66513079302542	Plaza Mayor, 1B
APE1r2	-2.969402330571834	40.66470695696344	Plaza Mayor, 1B
APE2	-2.969996378899953	40.66472905893056	C/ Teófila Rojo, 11
APE3	-2.970973841144498	40.66493332668396	C/Teófila Rojo, 45
APE4	-2.970032786549209	40.66467098351769	C/ Los Catalanes, 5
APE5	-2.969996378899953	40.66472905893056	C/ La Iglesia, 45
APE6	-2.970179251689744	40.6648873861998	C/ La Iglesia, 29
APE7	-2.970179251689744	40.6648873861998	C/ La Iglesia, 9
APE8	-2.969636040208028	40.66486044883605	C/San Roque, 10
APE9	-2.969593604274181	40.66463782498713	Travesía de la Soledad, 25
APE10	-2.968896335947494	40.66479597169908	C/ La Soledad, 10
APE11	-2.969636040208028	40.66486044883605	C/ de la Fragua, 2
APE12	-2.969996378899953	40.66472905893056	C/ de la Fragua, 25

Tabla 3.7: Ubicación de APs en el núcleo urbano de Valdeavellano

Se ha procurado seleccionar puntos de vía pública con red eléctrica para alimentar los APs, aunque es necesario el uso de dispositivos power injector y el modelo seleccionado [35] permite hasta 100 m de distancia.



Figura 3.17: Ubicación de APs con Google Earth

La red mallada se establecerá usando 802.11ac en la frecuencia de 5GHz. Bajo esta premisa, además de los datos de potencia de transmisión (23 dBm), ganancia (9 dBi) y sensibilidad (-80 dBm) del datasheet (véase Tabla 3.6) del AP, así como considerando una altura de instalación de 3m, se realiza una simulación de red en estrella con Radio Mobile, obteniendo como resultado el mostrado en la Figura 3.18. Como se puede apreciar en la Figura 3.18 todos los enlaces son viables, incluso entre los APE4 y APE9 que son los más alejados entre sí.

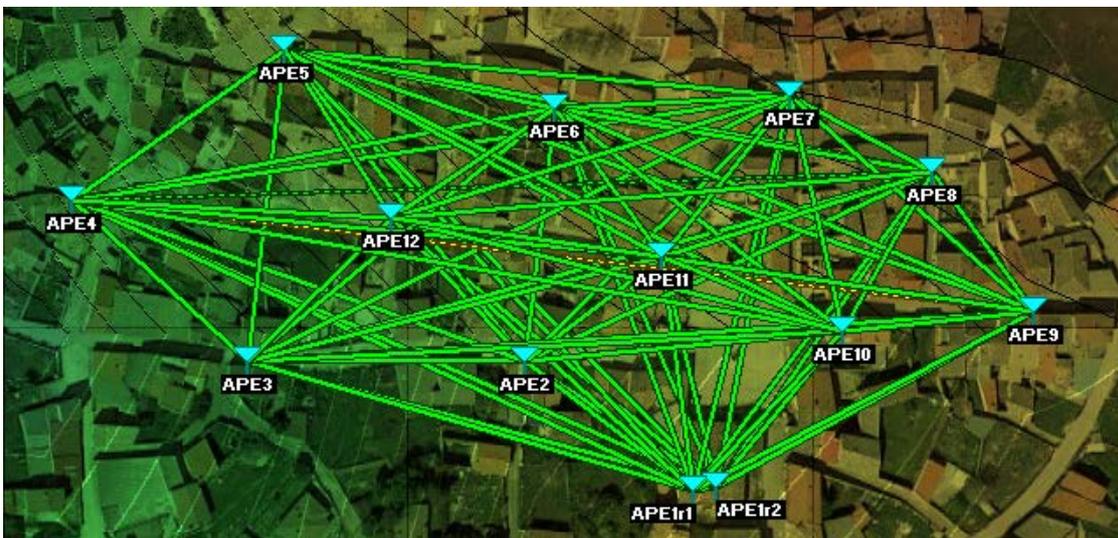


Figura 3.18: Simulación de enlaces en estrella con Radio Mobile

Para simular la cobertura se hará uso, al igual que para la red de interior, del aplicativo HiveManager NG de Aerohive. Para crear la “Global View” se selecciona un entorno “Outdoor Suburban” y se añade un plano generado con Google Earth indicando en metros el ancho y largo de la superficie del mismo. Se añade los APs y se colocan sobre el plano de forma manual. Se indica en cada AP la potencia de emisión y asignación automática de canal. Con todo esto, ya se puede obtener los mapas de calor en los que se puede ver los niveles de cobertura en cada zona del mapa.

En la Figura 3.19 y 3.20 se puede ver los mapas de calor RSSI para 2.4GHz y 2.5 GHz respectivamente y a continuación se mostrarán los mapas de calor

para SNR (Figuras 3.21 y 3.22), canales utilizados (Figuras 3.23 y 3.24) y ratio de datos obtenidos (Figuras 3.25 y 3.26), comentándose los resultados al final.



Figura 3.19: 2.4GHz RSSI Heat Map

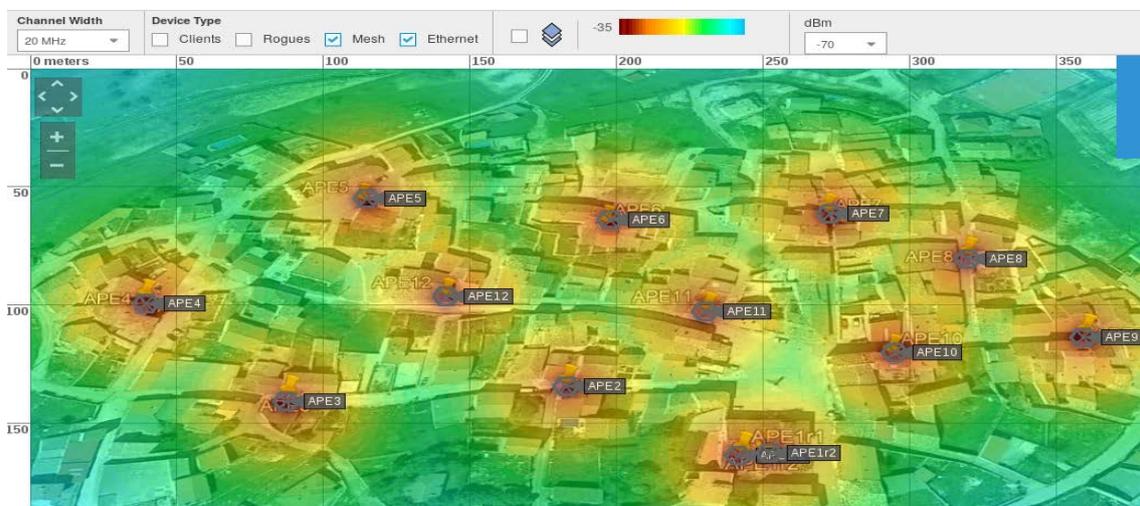


Figura 3.20: 5 GHz RSSI Heat Map

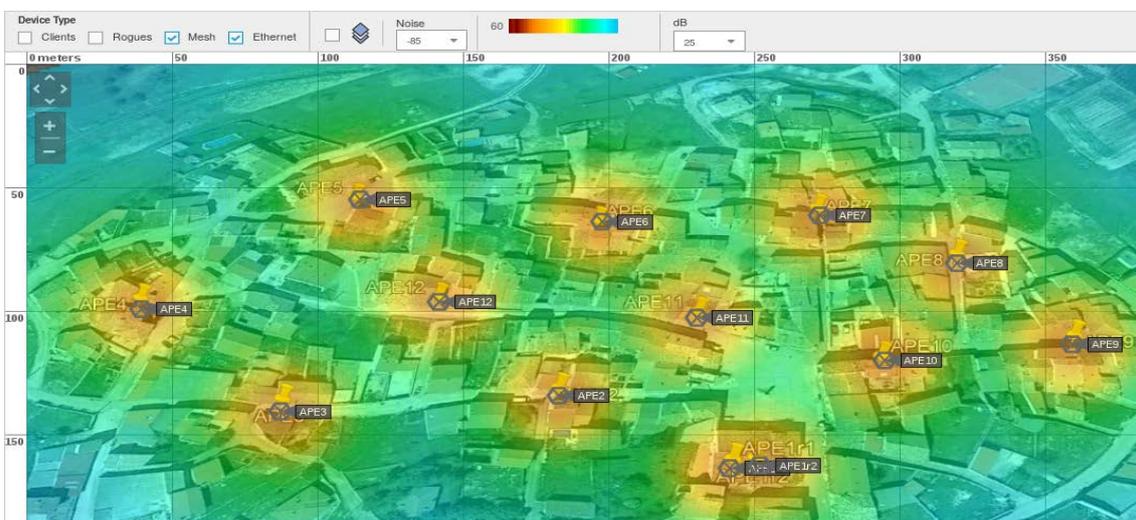


Figura 3.21: 2.4GHz SNR Heat Map



Figura 3.22: 5 GHz SNR Heat Map

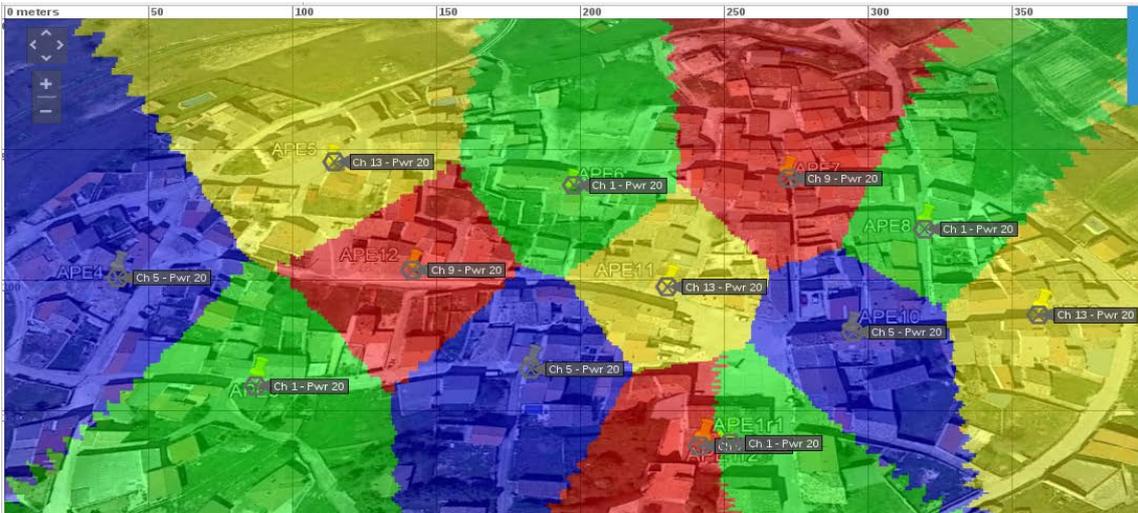


Figura 3.23: 2.4 GHz Channel Heat Map

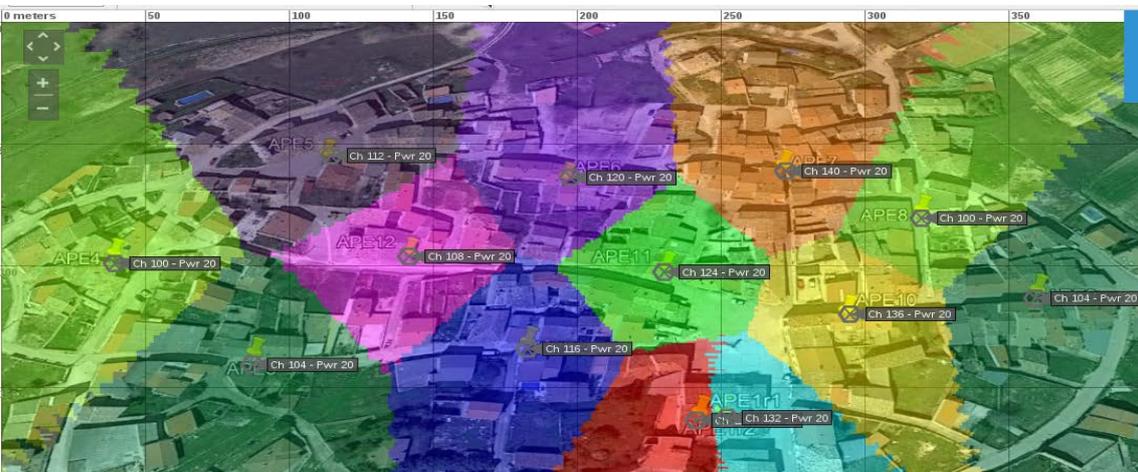


Figura 3.24: 5Ghz Channel Heat Map

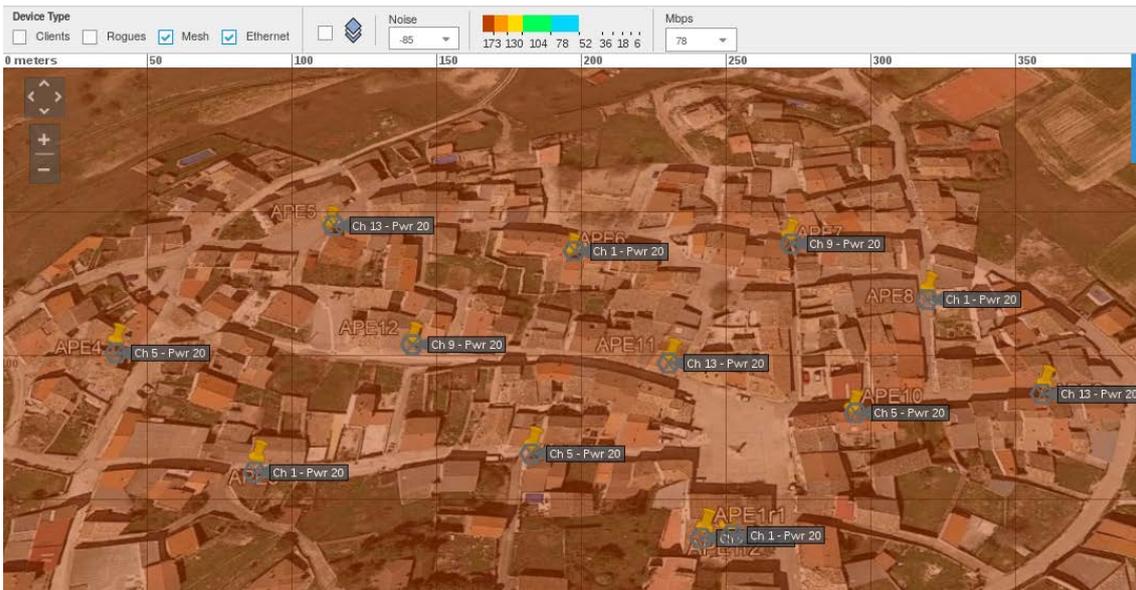


Figura 3.25: 2.4 GHz Data Rates Heat Map

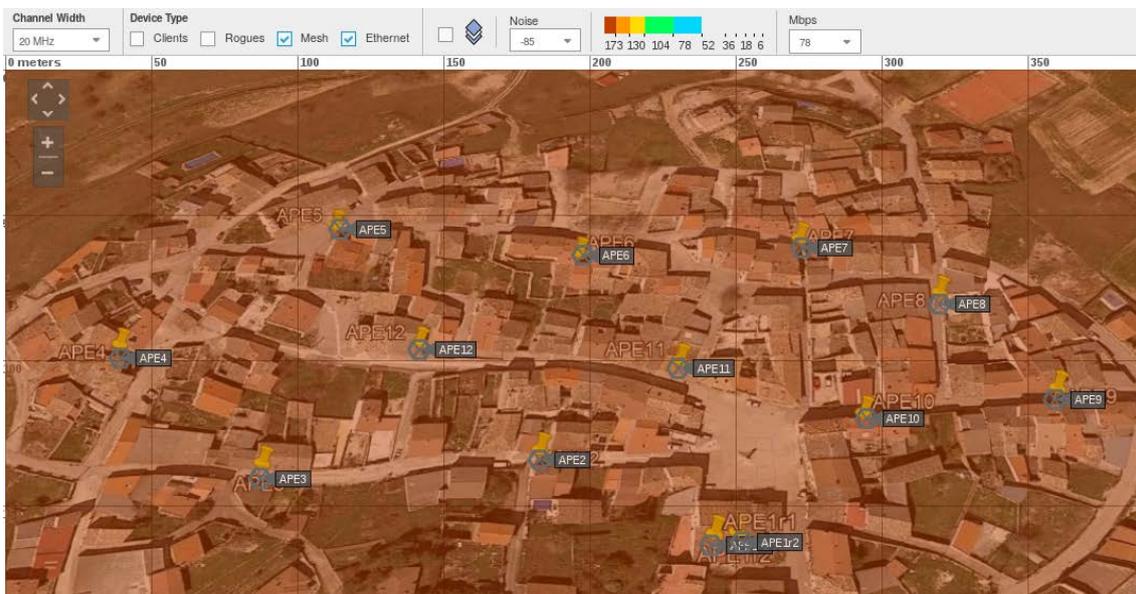


Figura 3.26: 5 GHz Data Rates Heat Map

El ancho de canal utilizado para las simulaciones es de 20 MHz. En las Figuras 3.19 y 3.20 se puede ver los mapas de calor RSSI para 2.4 GHz y 5 GHz respectivamente. En las zonas de menor cobertura, RSSI tiene valores de aproximadamente -51 dBm en 2.4 GHz y -66 dBm en 5 GHz. No obstante, en ambos casos se puede ver que sí se garantiza la cobertura en toda el área urbana, aunque en el caso de 5GHz es algo menor en las zonas más alejadas de los APs.

Las Figuras 3.21 y 3.22 muestran los mapas de calor de la relación señal ruido. En ambos casos la relación es buena, aunque en 5 GHz es más baja lo que implica mayor probabilidad de interferencias. Lo recomendable es que no baje de 25 dB y en este caso en las peores zonas es aproximadamente 28 dB.

La asignación de canales ha sido realizada de forma automática y se puede ver en la Figura 3.23 para 2.4 GHz y en la 3.24 para 5 GHz. Cada color representa un canal y en ambos casos se puede ver que no hay áreas contiguas del mismo color, lo que implica que no debería de haber interferencias por solapamiento de canal.

En lo referente a la capacidad de la red, se puede ver en las Figuras 3.25 y 326 los ratios para la banda de 2.4 GHz y 5 GHz respectivamente. En ambos casos la escala de color indica un ratio de aproximadamente 130 Mbps. En la Tabla 3.8 se muestra un resumen de los datos obtenidos mediante simulación y cálculo.

Red Wi-Fi exterior. Cálculos teóricos.		
Parámetro	Valor	
	Frecuencia 2.4 GHz	Frecuencia 5 GHz
Potencia Rx AP (Simulación)	-51 dBm	-66 dBm
Distancia seguridad	5,64 cm	7,98 cm
Capacidad Internet: U. concurrentes / Ratio	552 / 256 Kbps	
Capacidad Intranet: U. concurrentes / Ratio	100 / 1,34 Mbps por usuario (peor caso)	

*Se considera como Ratio teórico 144.4 Mbps. Según datasheet este puede variar desde los 7.2 Mbps a los 866.7 Mbps

Tabla 3.8: Red Wi-Fi exterior. Resumen de datos calculados y simulados

Por todo lo expuesto, se puede concluir que el diseño realizado para la red Wi-Fi de exterior cubre con los requerimientos fijados.

3.6.2 Equipamiento

Para implementar la red Wi-Fi interior se ha seleccionado el AP modelo Aironet 1542D del fabricante Cisco.



Figura 3.27: Cisco Aironet 1542D Access Point
Fuente: Cisco

Al soportar el estándar 802.11ac Wave 2, el 1815i ofrece una velocidad de datos de hasta 867 Mbps en la banda de 5 GHz. Esto mejora las velocidades de datos ofrecidas por el estándar 802.11n, también soportado por el dispositivo. Se puede llegar a conseguir una velocidad total de datos de hasta 1 Gbps mediante la agregación de radio dual.

El 1542D permite el acceso por cable a través de un único puerto de autodetección RJ-45 10/100/1000. Es compatible con PoE 802.3af, por lo que se alimentará a través del cable de red evitando la instalación de puntos eléctricos. En este caso, se requerirá del uso de módulos AIR-PWRINJ-60RGD2 power injector [35].

En lo referente a seguridad, cumple con los requerimientos de seguridad 802.1x, según se requería en el apartado 3.1. Cumple con la normativa IEC 60529 IP67 para poder ser instalado en exterior. Para más detalles consultar su datasheet en Anexo 8.2.2.

3.7. Arquitectura de red

La arquitectura de la red queda conformada por tres bloques. La Figura 3.28 muestra la arquitectura de la red de Valdeavellano.

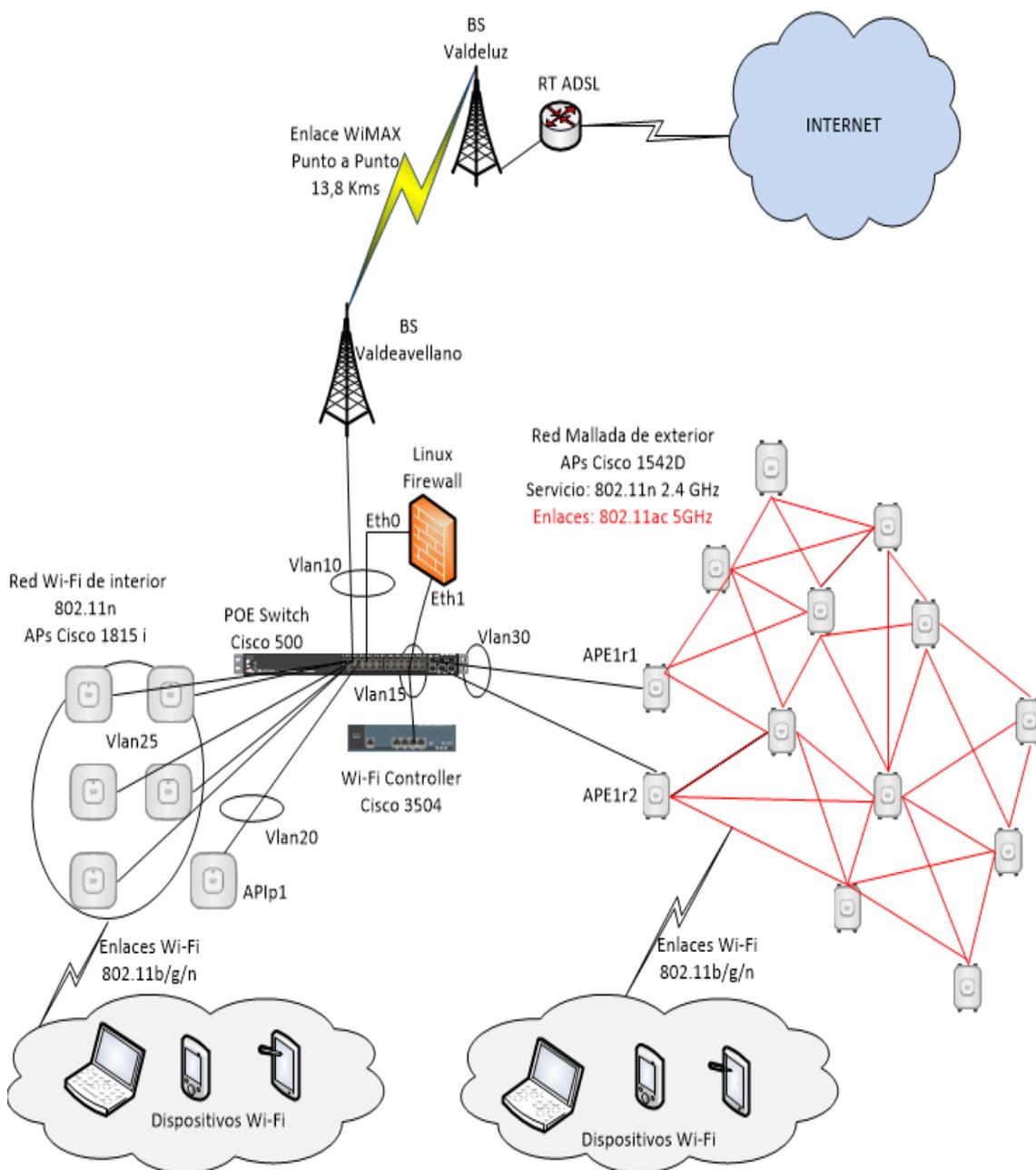


Figura 3.28: Arquitectura de red

En la Tabla 3.9 se puede ver el detalle de las redes a implementar.

VLAN	Dispositivo	Puerto switch Cisco	Direccionamiento GW: 172.16.0.1	Asignación	Función
No aplica (n.a.)	RT Telefónica	n.a.	172.16.0.1/24	Estática	
	BS Valdeluz	n.a.	172.16.0.4/29	Estática	
VLAN_ID:10 VLAN_NAME: WAN	BS Valdeavellano	1	172.16.0.5/29	Estática	Conectividad entre la BS y el Firewall (FW)
	FW Eth0	2	172.16.0.6/24	Estática	
VLAN_ID:15 VLAN_NAME: LAN	FW Eth1	3	172.16.0.8/24	Estática	802.1q Trunk. VLANs tagueadas. Vlan reflejada en puerto 24 para analizar tráfico.
	Controlador Wifi	4	172.16.0.9/24	Estática	802.1q Trunk.
VLAN_ID:20 VLAN_NAME: WifiProfesional	APIp1	5	172.16.0.10/24	Estática	WiFi interior: AP "APIp1". Uso profesional (Médico y Alcalde).
VLAN_ID:25 VLAN_NAME: WifiInt	APIu1-5	6 - 10	172.16.0.0/25	DHCP	WiFi interior: 5 Aps. Acceso público.
VLAN_ID:30 VLAN_NAME: WifiExt	APE1-12	11,12	172.16.0.128/25	DHCP	Wifi Exterior: 13 Aps. Uso público.

Tabla 3.9: Resumen de Red

3.7.1. Red troncal enlace PtP

Se ha de Implementar con tecnología WiMAX 802.16-2012 mediante los modelos AXS-BS-450-N del fabricante Alentia. El equipo dispone de 4 canales de radio independientes de hasta 10 MHz. En caso de usar los 4 su capacidad es de 140 Mbps netos. En este caso solo se utiliza uno, por lo que la capacidad del enlace es de 35 Mbps. No obstante la salida a Internet es, como ya se ha comentado, a través de ADSL de 30 Mbps.

Se hace uso de banda libre a 5GHz. Para minimizar el uso espectral y mejorar la protección ante interferencias se usa canales muy estrechos, así como tecnología ARQ, PBIM y TBIM. La red usará modulación OFDM de 256 portadoras y como subportadoras BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM(7 niveles diferentes con combinación FEC). Como tecnología de acceso al medio usa TDMA y como técnica de duplexación usa TDD. Aplicará QoS para limitar a 256 Kbps el rate por cliente.

En lo referente a seguridad se implementará con cifrado AES 256 además de certificados x.509 entre ambos puntos del enlace. La BS de Valdeavellano se conectará vía Gigabit Ethernet con la red troncal IP, en el caso de Valdeluz se conectará al router ADSL de Telefónica. Su latencia es de 5 ms y soporta VLANs (802.1q), las cuáles se implementarán para cada una de las redes de acceso Wi-Fi, véase Tabla 3.9. Su gestión se hará por SSH, SNMP y WEB.

Cada equipo WiMAX que conforma el enlace tendrá asociada una antena de plato modelo HG495DP-34D con polarización horizontal y ganancia de 34 dBi. Las antenas se protegerán con para rayos ALR06 Alfa Network.

3.7.2. Red troncal Ethernet

Se trata de la red que interconectará el enlace PtP con las redes Wi. Se implementa bajo el estándar Gigabit Ethernet (802.3ab). Sus elementos son:

- Switch Cisco SG350X-24MP (24 puertos Gigabit). Tiene una capacidad de switching de 128 Gbps. Soporta POE, necesario para conectar los 6 APs de la Wi-Fi de interior, así como los dos APs que funcionarán en modo RAP en la Wi-Fi externa. Permite VLAN a nivel de puerto o mediante etiquetas (802.1q). Se usará 802.1q, configurando el puerto 3 en modo trunk para sacar por él el tráfico de las VLANs 20, 25 y 30, véase Tabla 3.9. La pasarela por defecto (GW) será el RT de Telefónica.
- CISCO 3504 wireless controller. Se le habilita 802.1q para poder entenderse con el Switch Cisco SG350X-24MP y 802.1x para el control (autenticación, autorización y accounting) de usuarios mediante Radius.
- Servidor DELL PowerEdge T440. Sistema Linux (Centos) que hará funciones de Firewall (Iptables), IDS (Snort), Proxy (Squid) y Radius (Free Radius). Mejorará la seguridad de la red y la navegación web. Una interface Gigabit (Eth0) irá conectada a la BS de Valdeavellano y otra interface Gigabit (Eth1), configurada para soportar 802.1q, irá conectada al Switch Cisco SG350X-24MP. Se configurará Proxy ARP, de tal manera que si el servidor se avería, bastará con puentearle conectando el cable del puerto 2 al 3, véase Tabla 3.9.

Todos los elementos de esta red se ubican en el CPD localizado en el edificio del Ayuntamiento (véase Figura 3.12). La alimentación electrónica de los elementos será a través de un SAI modelo SMC 1000I del fabricante APC.

3.7.2. Red de acceso Wi-Fi

En este apartado se describen las redes Wi-Fi de acceso. En el caso de la de interior, los APs modelo Cisco Aironet 1815i irán cableados hasta el Switch Cisco SG350X-24MP, considerando que el switch y los APs soportan POE (802.3af) no se requiere alimentación eléctrica. Los APs darán servicio 802.11n en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz y las comunicaciones se cifrarán con el algoritmo AES. Aunque en el apartado 3.5 se indicó que la velocidad obtenida era 144 Mbps, haciendo uso de la tecnología 2x2 MIMO, se podrían obtener velocidades de hasta 300 Mbps.

En lo referente a la red WiFi mallada de exterior, todo lo expuesto para la de interior aplica a esta. En este caso solo van cableados al switch los APs APE1r1 y APE1r2, que tienen el rol de Root Access Point (RAP), el resto su rol es Mesh Access Point (MAP). Los RAP son los que se encargan de entregar los paquetes a la red Ethernet. Para la alimentación de los dispositivos se hará uso de módulos power injector modelo AIR-PWRINJ-60RGD2 del fabricante Cisco. La comunicación entre los MAPs y de estos con los RAPs se realizará a través de la radio 802.11a/b/ac usando 802.11ac que aporta mayor capacidad de canal. Por la radio 802.11b/g/n se dará servicio a los usuarios usando 802.11n.

Una red mallada se caracteriza por proporcionar rutas alternativas, esto por un lado garantiza que si un AP queda inoperativo el servicio no se ve afectado, pero por otro lado, la comunicación no es directa entre el AP y la red troncal

Ethernet, sino que los paquetes van de AP a AP hasta que un RAP hace la entrega. Estos saltos implican un mayor retardo, lo que hacen que la velocidad de la red sea algo más lenta, tal y como se ha comentado en el apartado 3.6.

3.8. Resumen

Tanto por los análisis teóricos como por las simulaciones realizadas en los apartados 3.4 y 3.5, se puede concluir que la solución es válida para cubrir el objetivo principal de dotar de un acceso a Internet de 256 Kbps a 100 usuarios concurrentes en el municipio de Valdeavellano, garantizando la seguridad de las comunicaciones.

En el caso de acceso a la Intranet, considerando que las estimaciones se realizaron considerando el rate teórico de 144.4 Mbps, en la WiFi externa solo se puede dar servicio a 10 Mbps a 72 usuarios en el peor de los casos, que es con un solo RAP.

En la Tabla 3.10 se recoge un resumen de los diferentes niveles de cumplimiento para cada objetivo.

Objetivo	Cumplimiento	Descripción
Cobertura Wi-Fi	100%	Constatado de forma teórica en apartados 3.5 y 3.6 para la WiFi de interior y en 3.6 y 3.7 para la de exterior.
Soporte estándar 802.11 b/g/n	100%	Ambos modelos de AP lo soportan.
Itinerancia	100%	Al usar mismo SSID los AP de cada red, el sistema posibilita la itinerancia.
Gratuidad del servicio	100%	Sujeto a obtención de suvención, en caso desfavorable se tendría que aplicar modelo de pago por uso.
Rate: 256 Kbps de acceso a Internet para 100 usuarios concurrentes	100%	La capacidad de la red queda limitada por el radio enlace y este puede dar servicio hasta 136 usuarios. Véase Tabla 3.3.
Rate: 10 Mbps de acceso a Intranet para 100 usuarios concurrentes	100%	Wifi interior: capacidad para 72 usuarios (Rate AP 144.4 Mbps). Haciendo uso de las dos antenas el ratio por AP sería de 300 Mbps. Wifi exterior: capacidad para 1,34 Mbps en peor de los casos.
Escalabilidad	100%	Cualquiera de las tres redes permite su crecimiento añadiendo nuevos equipos.
Disponibilidad	70%	100% en APs de redes WiFi. No en Electrónica de red (FW, Switch y Controlador WiFi) y radio enlace.
Seguridad	100%	Red: Cifrado AES. Control de acceso vía Radius: Autenticación, Autorización y Accounting (802.1x). Separación lógica de redes por VLAN. Análisis de tráfico con IDS. Control de contenidos en Proxy. Exposición radioeléctrica: Distancia de seguridad estimada de 17,85 cm.
QOS	100%	Aplicado en BSs.
Viabilidad económica	50%	Queda sujeta a la obtención de financiación, bien pública o privada.

Tabla 3.10: Resumen niveles de cumplimiento

4. Valoración económica

Detalle	Unidades	PVP	Total
Antena DS_HG4958DP-34D	2	327,91 €	655,82 €
Pararayos ALR06 Alfa Network + cable tierra	2	55,00 €	110,00 €
Cable coaxial HDF200 N-macho a N-hembra 2m	2	13,65 €	27,30 €
Bobina 300m cable CAT 6	1	65,00 €	65,00 €
Mastil telescópico 8m	1	145,00 €	145,00 €
Mástil 25m	1	650,00 €	650,00 €
Albentia AXS-BS-450-N	2	5.500,00 €	11.000,00 €
Cisco Aironet 1815i	6	214,80 €	1.288,80 €
Cisco Aironet 1542D	13	650,78 €	8.460,14 €
Cisco Power injector AIR-PWRINJ-60RGD2	11	427,94 €	4.707,34 €
CISCO 3504 wireless controller (AIR-CT3504-K9)	1	2.418,70 €	2.418,70 €
Switch Cisco SG350X-24MP	1	1.206,65 €	1.206,65 €
Servidor DELL PowerEdge T440	1	1.302,00 €	1.302,00 €
SAI APC SMC 1000I	1	374,85 €	374,85 €
Varios (conectores, bridas, tornillería ...)	1	275,00 €	275,00 €
Soporte de Ingeniero	40	75 €	3.000,00 €
Mano de obra técnico	120	45 €	5.400,00 €
		TOTAL	41.086,60 €

Al pretender gratuidad en la prestación del servicio, en término económico, implica que no habrá retorno de la inversión. En base a la capacidad económica del Consistorio, para poder abordar tal proyecto, se requeriría de subvención, que tal y como se indicó en el apartado 2.3.4.1, al tratarse de una Administración Pública, se podría solicitar al Estado, y en caso de resolución favorable cursar la notificación pertinente a la Comisión Europea.

En caso de optar por un modelo de pago por uso, asumiendo el coste de un servicio ADSL profesional (Movistar) [38] y considerando los datos de la Tabla 4.1 en base a una financiación ICO a 5 años (1 año de carencia) [39], a la cual se pueden acoger las Administraciones Públicas, el retorno de la inversión (ROI) es:

$$ROI = \frac{\text{Ingresos} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} = \frac{(10€ \cdot 100 \cdot 60) - (770,10€ \cdot 60 + 40€ \cdot 60)}{(770,10€ \cdot 60 + 40€ \cdot 60)} = 23,44\%$$

Ingresos		Gastos					Resultados		
Usuarios	Cuota	Préstamo ICO				ADSL	ROI 5 años	ROI anualizado	Ganancia en 5 años
		Presupuesto	TAE	Plazo	Cuota				
100	10€/mes	41.086,60 €	4,72%	60 meses	770,1€/mes	40€/mes	23,44%	4,30%	11.394 €

Tabla 4.1: Datos para ROI

En base a los resultados, el proyecto sería viable económicamente.

5. Conclusión

Gracias a estándares inalámbricos como los expuestos a lo largo del presente documento, se ha hecho realidad poder desplegar redes de datos en zonas rurales, donde las grandes operadoras no ven rentabilidad en la implementación de soluciones cableadas. Este tipo de soluciones, por tanto, permiten dotar de redes de banda ancha a núcleos hasta ahora excluidos de disfrutar de los servicios básicos que aporta Internet, reduciendo así la brecha digital en este tipo de zonas.

De las soluciones tratadas para proporcionar un acceso de banda ancha, ha sido WiMAX, a pesar de suponer un mayor coste inicial, la elegida por haber sido considerada la más óptica por sus características técnicas. Además había un especial interés por el autor en ampliar conocimientos sobre esta tecnología.

Tal y como se ha justificado a lo largo del trabajo, se ha cumplido con el objetivo de dotar a Valdeavellano con un acceso de banda ancha de acceso a Internet para navegación y correo, e incluso visualización de vídeo a 360p (véase Tabla 3.10 al final del punto 3.8). Además, la solución propuesta permitirá, tanto al Consistorio como a la Asociación Cultural Amigos de Valdeavellano prestar servicios de interés general a los vecinos del municipio, como repositorios de contenido multimedia (vídeos, fotos, etc.), Intranet, o juegos en línea.

Como perspectiva de futuro, desde el punto de vista tecnológico, queda el estudio para implementar el enlace punto a punto mediante Wild (véase apartado 2.5). En lo que a modelo de servicio se refiere, cabría la posibilidad de pasar a un servicio de pago por uso, ampliando la velocidad de acceso por usuario y cobrando una cuota al mes a los usuarios interesados. En esta línea, se podría analizar la viabilidad de reutilizar las estaciones base WiMAX para crear nuevos enlaces con municipios cercanos como Atanzón, Caspueñas o Valdesaz, así como implementar una red de videovigilancia, ya que en los últimos años han sido varios los robos perpetrados en el municipio.

6. Glosario

ACK	Acknowledgment
AES	Advanced Encryption Standard
AP	Access Point
B2B	Business To Business
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BS	Base Station
BSS	Servicios básicos
CA	Collision Avoidance
CCA	Clear Channel Assessment
CCK	Complementary Code Keying
CD	Collision Detectio
CMT	Comisión de Mercado de Telecomunicacionesotro
CPE	Customer Premises Equipment
CNAF	Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
CPD	Data Processing Center
CSMA	Carrier-Sense Multiple Access
CTS	Clear to Send
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	Distributed coordination function IFS
DS	Distributed System
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
ESSID	Extended SSID
FER	Frame error rate
FM	Frecuency Modulated
FTTH	Fiber to The Home
GHz	Gigahertz
GW	Gateway
IBSS	Conjunto independiente de servicios básicos
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
IT	Information Technologies
ICT	Information and Communication Technologies
QoS	Quality of Service
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
LOS	Visión directa
MAC	Medium Access Control
MAP	Mesh Access Point

Mbps	Mega bit per second
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NLOS	Sin visión directa
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCF	Point Coordinatio Functio
PER	Packet Error Rate
PIFS	Point coordination function IFS
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PMD	Physical Medium Dependent
POE	Power Over Ethernet
PPDU	Protocol Data Unit
PTP	Punto a Multipunto
PHY	Capa Física
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAP	Root Access Point
RSSI	Received Signal Strength Indicatio
SDM	Multiplexado de División Espacial
SIFS	Short IFS
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SNMP	Simple Network Management Protocol
SS	Suscriber Station
SSID	Service Set Identifiers
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WILD	WiFi Long Distance
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPAN	Wireless Personal Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Networks

7. Bibliografía

- [1] **WiMAX forum.** <http://www.wimaxforum.org>.
- [2] **Prashant Sharma.** June 2009. Facts About WiMAX And Why Is It “The Future of Wireless Broadband”. Recuperado de internet el 8 de marzo de 2018: <https://www.techpluto.com/wimax-in-detail/>
- [3] **Rifki Muhendra, Aditya Rinaldi, Maman Budiman, Khairurrijal.** 2016. Development of WiFi Mesh Infraestructure for Internet of Things applications. Recuperado de internet el 8 de marzo de 2018: https://ac.els-cdn.com/S1877705817311566/1-s2.0-S1877705817311566-main.pdf?tid=682119c8-f7a9-11e7-b6ce-00000aab0f27&acdnat=1515769442_434bb7e5bda37153c0ee5c417b5efa11
- [4] **Subsecretaria de Innovación y Calidad. Gobierno Federal México.** *Programa de Acción Específico 2007-2012. Telesalud.* Página 13. Recuperado de internet el 26 de abril de 2018: www.who.int/goe/policies/countries/mex_telehealth.pdf
- [5] **Lifesize.** 2017. *Prácticas recomendadas para la red de videoconferencias.* Capítulo: ¿Cuánto ancho de banda necesito?
- [6] **Wikipedia.** *Bit rate.* Recuperado de internet el 26 de abril de 2018: https://en.wikipedia.org/wiki/Bit_rate#Multimedia
- [7] **Wikipedia.** Personal area network. Recuperado de internet el 10 de marzo de 2018: https://en.wikipedia.org/wiki/Personal_area_network#Wireless_personal_area_network
- [8] **Wikipedia.** Wireless LAN. Recuperado de internet el 10 de marzo de 2018: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_LAN
- [9] **Wireless Network.** Recuperado de internet el 11 de marzo de 2018: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_network#cite_note-8
- [10] **Timo Vanhatupa.** Wi-Fi Capacity Analysis for 802.11ac and 802.11n: Theory & Practice. Recuperado de internet el 15 de marzo de 2018: https://www.ekahau.com/wp-content/uploads/2017/01/Wi-Fi_Capacity_Analysis_WP.pdf
- [12] **William Stallings.** *Wireless Communications and Networks.* Second Edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005. ISBN 0-13-191835-4.
- [13] **Wikipedia.** Carrier sense multiple access with collision avoidance. Recuperado de internet el 20 de marzo de 2018:
- [14] **INE.** <http://www.ine.es/>
- [21] **IEE Standads Association.** IEEE Std 802.16-2017 (Revision of IEEE Std 802.16-2012) - IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. Recuperado de internet el 2 de mayo de 2018: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.16-2017.html>
- [24] **3GPP.** The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). <http://www.3gpp.org/>
- [25] **ITU.** ITU global standard for international mobile telecommunications ‘IMT-Advanced’. Recuperado de Internet el 6 de mayo de 2018: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-adv/Pages/default.aspx>

- [27] **Sergio Ferrer**. 2015. La aventura de conseguir internet donde no hay internet. El Confidencial. Recuperado de Internet el 15 de mayo de 2018: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2015-01-10/la-aventura-de-conseguir-internet-donde-no-hay-internet_619156/
- [28] **UIT**. Cálculo de la atenuación en el espacio libre. Recuperado de Internet el 15 de mayo de 2018: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-2-199408-I!!PDF-S.pdf
- [29] **Antonio Satué Villar**. UOC. Redes de gran alcance sin hilos. Página 17.
- [30] **Mastil-Boom**. Mástil de Aluminio 8.9-2 Robusto. Recuperado de Internet el 16 de mayo de 2018: <https://mastil-boom.es/es/mastiles/805-mastil-de-aluminio-89-2-robusto-mbmt-8r.html>
- [31] **Iberti**. Mástiles de gran altura de fabricación estándar en aluminio. Recuperado de Internet el 16 de mayo de 2018: <https://www.iberiti.es/mastiles/gran-altura-aluminio/>
- [32] **Aerohive**. HiveManager NG. <https://cloud.aerohive.com/login#/login>
- [33] **Aerohive**. AP250 Datasheet. Recuperado de Internet el 18 de mayo de 2018: https://www.aerohive.com/wp-content/uploads/Aerohive_Datasheet_AP250.pdf
- [34] **Aerohive**. AP1130 Datasheet. Recuperado de Internet el 18 de mayo de 2018: https://www.aerohive.com/wp-content/uploads/Aerohive_Datasheet_AP1130.pdf
- [35] **Cisco**. Cisco Aironet Series Power Injectors AIR-PWRINJ-60RGD1= and AIR-PWRINJ-60RGD2= Installation Instructions. Recuperado de Internet el 20 de mayo de 2018: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/access_point/power/guide/air_pwrinj_60rgd.html#pgfId-61904
- [36] **Pablo García Mexía, Lorena Rivera Novillo**. BOE. 2018. Código de las Telecomunicaciones. Recuperado de Internet el 22 de mayo de 2018: https://www.boe.es/legislacion/codigos/abrir_pdf.php?fich=110_Codigo_de_las_Telecomunicaciones.pdf
- [37] **BOE**. 2010. Resolución de 18 de junio de 2010. Núm 192, Sec III, Pág 69711. Recuperado de Internet el 22 de mayo de 2018: www.boe.es/boe/dias/2010/08/09/pdfs/BOE-A-2010-12831.pdf
- [38] **Movistar**. Recuperado de Internet el 9 de junio de 2018: <http://www.movistar.es/empresas/banda-ancha/>
- [39] **Instituto de Crédito Oficial (ICO)**. ICO Empresas y Emprendedores 2018. Recuperado de Internet el 9 de junio de 2018: <http://www.ico.es/web/ico/ico-empresas-y-emprendedores/-/lineasICO/view?tab=tipolInteres>

8. Anexos

8.1. Anexo I. Equipamiento WiMAX

8.1.1 Antena



www.L-com.com

HyperLink Wireless 4.9 to 5.8 GHz 34 dBi Dual Polarity & X Polarized/Dual Feed Dish Antenna - Model: HG4958DP-34D

Applications

- 5.1/5.3/5.4/5.8 GHz ISM and UNII Band Applications
- 4.9 GHz Public Safety Band
- MIMO and 802.11 n Applications
- WiMAX Applications
- Long Distance Backhaul and Point to Point Data Links

Features

- Wide bandwidth
- Aluminum reflector dish with UV stable light gray polymer finish
- Adjustable Dual and X Polarity feed horn system with (2) N-Female connectors
- Perforated dish helps reduce wind loading
- Includes tilt and swivel mast mount kit



Description

The HyperGain model HG4958DP-34D is a high performance broadband dual polarized solid dish antenna. Because of its' superb electrical performance and mechanical stability, the parabolic dish antenna can be used in a wide variety of high performance 4.9GHz and 5GHz range (5.1/5.3/5.4/5.8GHz) wireless applications. The wide band design of this antenna eliminates the need to purchase different antennas for each frequency. This simplifies installations since the same antenna can be used for a wide array of wireless applications. This antenna features 31 - 34 dBi of gain with a 3.3° horizontal beam-width and 3.3° vertical beam-width.

Adjustable Dual Polarity Feed Horn System

The HG4958DP-34D features an adjustable dual polarity feed horn system which allows the antenna to be configured for Dual Polarization (horizontal and vertical) or for X-Polarization (+45° and -45°). It is fed via two N-Female connectors, one for each polarized signals. This feature makes it ideal for MIMO/802.11n and polarization diversity systems.



Rugged and Weatherproof

The reflector dish of the HG4958DP-34D is constructed from high quality aluminum which gives it superior strength. The dish is coated in a light gray UV-inhibited polymer for durability and aesthetics. Perforated holes in the dish helps minimize wind loading.

L-com, Inc. 50 High St., West Mill, 3rd Floor, Suite #30 North Andover, MA 01845
www.L-com.com E-mail: sales@L-com.com Phone: 1-800-343-1455 Fax: 1-978-689-9484
© L-com, Inc. All Rights Reserved. L-com Global Connectivity and the L-com logo are registered marks.

The HG4958DP-34D is supplied with a tilt and swivel mast mount kit. This allows installation at various degrees of incline for easy alignment. It can be adjusted up or down from 0° to 30°.

Specifications

Mechanical Specifications

Connector Interface	(2) N Female
Diameter	35.43 in (900mm)
Weight	21.16 lbs (9.6kg)
Mounting Mast Size	1.6 - 3 in (40-75mm)

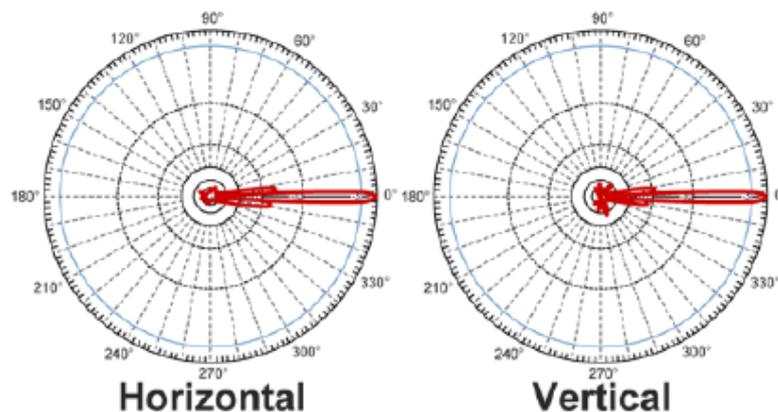
Electrical Specifications

Frequency	4750 – 5850MHz
Gain	31 dBi @ 4.9-5.3 GHz / 34 dBi @ 5.4 – 5.8 GHz
Polarization	Adjustable - Dual Polarized (Vertical and Horizontal) or X-Polarized (+45° and -45°)
Horizontal /Vertical Beam-width	3.3°/ 3.3°
F/B ratio	>40dB
Cross-pol Isolation	>30dB
Max Input Power	100 watts
Impedance	50 Ohm

Wind Loading Data

Wind Speed (MPH)	Loading
100	266 lbs
125	400 lbs

RF Antenna Patterns



L-com, Inc. 50 High St., West Mill, 3rd Floor, Suite #30 North Andover, MA 01845
 www.L-com.com E-mail: sales@L-com.com Phone: 1-800-343-1455 Fax: 1-978-689-9484
 © L-com, Inc. All Rights Reserved. L-com Global Connectivity and the L-com logo are registered marks.

8.1.2 Estación base

albentia
systems

AXS-BS-450-N

ESTACIÓN BASE DE CUATRO SECTORES 5GHz

- Gran protección frente a interferencias
- Capacidad neta de 140Mbps
- QoS por CPE y servicio
- Sincronismo GPS integrado
- Gran radio de cobertura LOS
- Full-outdoor IP67
- Compacta y bajo consumo
- 4 canales de 10MHz

CON TECNOLOGÍA
aerDOCSIS 



DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

La Estación Base AXS-BS-450-N ha sido diseñada para proporcionar cobertura y gran capacidad en redes de acceso en la banda de 5GHz, multiplicando la capacidad de la estación base AXS-BS-150. Proporciona hasta 140Mbps netos utilizando 4 canales radio independientes de hasta 10MHz, y ofrece una QoS equivalente a las redes de cable (HFC).

Se trata de un equipo full-outdoor de bajo consumo, alta capacidad, muy compacto, y con una gran capacidad de procesamiento. La estación base AXS-BS-450-N minimiza el uso espectral y proporciona la mejor protección ante interferencias gracias al uso de canales muy estrechos, ARQ, PBIM y TBIM entre otros mecanismos. Basada en la interfaz aerDOCSIS, proporciona al operador todas las ventajas de la nueva tecnología y mantiene compatibilidad con el estándar físico IEEE 802.16-2012.

APLICACIONES

- WISP y operadores inalámbricos
- Banda ancha rural
- Telefonía VoIP y Videoconferencia
- Líneas dedicadas para acceso corporativo
- Extensión de redes de fibra óptica
- IPTV
- Smart-metering

arba
access



Especificaciones técnicas

PARÁMETROS RADIO

Banda de trabajo	4900-5875MHz
Salto de canal	1MHz
Capacidad neta agregada	140 Mbps
Ancho de canal	10 / 7 / 5 / 3.5 / 1.75 MHz
Canales radio independientes	4
Eficiencia espectral neta	3,5bps/Hz
Sensibilidad BPSK	-92 dBm @ 10MHz -99 dBm @ 1.75MHz
Sensibilidad 64QAM	-74 dBm @ 10MHz -82 dBm @ 1.75MHz
Máx. potencia de Tx	23 dBm por canal / 29 dBm total
Antena	4 conectores N para antena externa
Modulación	OFDM de 256 portadoras
Mod. subportadora	Adaptativa BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM (7 niveles diferentes con combinación FEC)
FEC	Si, Reed-Solomon concatenado con código convolucional
DFS	Si
Analizador de espectros	Si, inteligente
Downlink/Uplink	Desde 100/0 hasta 0/100
Acceso al medio	TDMA sincrónico con implementación hardware
Técnica duplexación	TDD (Time Domain Duplexing)
Sincronismo TDD	GPS integrado

CALIDAD DE SERVICIO (QoS)

Control de QoS	Colas independientes por servicio, 5 niveles de QoS (BE, nRTPS, eRTPS, RTPS, UGS)
Máx. CPEs	Ilimitados
Diferenciación de servicios	Capa 2: Dirección MAC origen/destino, EtherType, etiqueta VLAN/PPPoE Capa 3: DSCP ToS, dirección IP origen/destino, subred, protocolo Capa 4: Puerto TCP o UDP origen/destino

NETWORKING Y SEGURIDAD

Funcionalidad de red capa 2	Bridging (IEEE 802.1)
VLAN	802.1q, 802.1p, soporte q-in-q, ilimitadas VLANs
Funcionalidad de red capa 3	Routing dinámico/estático, NAT, DHCP servidor/cliente
Cifrado	AES128/256
Latencia	5ms
Certificados X.509	Si, autenticación CPEs
Interfaz de datos	Gigabit Ethernet
Tamaño máx. paquete	2048 bytes

GESTIÓN

Remota	Web, SSH, XML-RPL, SNMP v1, 2 y 3
Avanzada	Soporte canal SMC, doble IP datos/gestión
Provisión de usuarios	Radius, CPS y fichero xml local

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Dimensiones	330 x 330 x 110 mm (embalado)
Dimensiones	265 x 265 x 70 mm (sin embalaje)
Peso	4,5 kg (herraje incluido)
Alimentador PoE (no incluido)	Entrada 100-240 VAC 50/60Hz Salida 56VDC (Opción entrada DC 36-72 VDC)
Consumo de potencia	< 30 W
Rango de temperatura	De -30°C a +55°C (ambiente, en operación)

ESTÁNDARES

Protocolo de acceso al medio radio	aerDOCSIS compatible con IEEE 802.16-2012
Radio	ETSI EN 302 326-2
Entorno	ODU: IP67 (protección), ETSI EN 60950-1:2006 (seguridad), IEC 61000-4-2 (ESD), IEC 61000-4-5 (Surge)

8.2. Anexo II. Equipamiento Wi-Fi

8.2.1 Wi-Fi de Interior

Nota: Solo se ha extraído la información importante para la realización del presente documento. El datasheet completo se puede obtener en el enlace:

<https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1815-series-access-points/datasheet-c78-738243.pdf>



Data Sheet

Cisco Aironet 1815i Access Point

Ideal for small and medium-sized networks, the Cisco® Aironet® 1815i Access Point brings a full slate of Cisco high-performance functionality to the enterprise environment.

Product Overview

The Cisco Aironet 1815i delivers industry-leading wireless performance with support for the latest Wi-Fi standard, IEEE's 802.11ac Wave 2 (Figure 1). It also meets the growing requirements of wireless networks by delivering a better user experience.

The 1815i extends support to a new generation of Wi-Fi clients, such as smartphones, tablets, and high-performance laptops that have integrated 802.11ac Wave 1 or Wave 2 support.

Figure 1. Cisco Aironet 1815i Access Point



Features and Benefits

By adhering to the 802.11ac Wave 2 standard, the 1815i offers a data rate of up to 867 Mbps on the 5-GHz radio. This exceeds the data rates offered by access points that support the 802.11n standard. It also enables a total aggregate dual-radio data rate of up to 1 Gbps. This provides the necessary foundation for enterprise and service provider networks to stay ahead of the performance expectations and needs of their wireless users.

Due to its convenience, in recent years corporate users have increasingly preferred wireless access as the form of network connectivity. Along with this shift, there is an expectation that wireless should not slow down users' day-to-day work, but should enable a high-performance experience while allowing users to move freely. The 1815i delivers industry-leading performance for highly secure and reliable wireless connections and provides a robust mobility end-user experience. Table 1 lists the features and benefits of the 1815i.

Product Specifications

Table 2 lists the specifications for the Cisco Aironet 1815i Access Point. Table 3 provides the access point's RF specifications.

Table 2. Specifications

Item	Specification																																																					
Authentication and security	<ul style="list-style-type: none"> Advanced Encryption Standard (AES) for Wi-Fi Protected Access 2 (WPA2) 802.1X, RADIUS authentication, authorization, and accounting (AAA) 802.11r 802.11i 																																																					
Software	<ul style="list-style-type: none"> Cisco Unified Wireless Network Software with AireOS Wireless Controllers Release 8.4 or later Cisco Mobility Express (future availability) 																																																					
Maximum clients	<ul style="list-style-type: none"> Maximum number of associated wireless clients: 200 per Wi-Fi radio, in total 400 clients per access point 																																																					
802.11ac	<ul style="list-style-type: none"> 2x2 single-user/multiuser MIMO with two spatial streams Maximal ratio combining (MRC) 20-, 40- and 80-MHz channels PHY data rates up to 866.7 Mbps (80 MHz on 5 GHz) Packet aggregation: A-MPDU (Tx/Rx), A-MSDU (Rx) 802.11 Dynamic Frequency Selection (DFS) Cyclic shift diversity (CSD) support 																																																					
Item	Specification																																																					
Ethernet ports	<ul style="list-style-type: none"> Authentication with 802.1X or MAC filtered Dynamic VLAN or per port Traffic locally switched or tunneled back to wireless LAN controller 																																																					
Bluetooth (future availability)	<ul style="list-style-type: none"> Integrated Bluetooth 4.1 (including BLE) radio Maximum transmit power: 4 dBm Antenna gain: 2 dBi 																																																					
Data rates supported	<p>802.11a: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps</p> <p>802.11b/g: 1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps</p> <p>802.11n data rates on 2.4 GHz:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">MCS Index¹</th> <th>GI² = 800 ns</th> <th>GI = 400 ns</th> </tr> <tr> <th>20-MHz Rate (Mbps)</th> <th>20-MHz Rate (Mbps)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>6.5</td><td>7.2</td></tr> <tr><td>1</td><td>13</td><td>14.4</td></tr> <tr><td>2</td><td>19.5</td><td>21.7</td></tr> <tr><td>3</td><td>26</td><td>28.9</td></tr> <tr><td>4</td><td>39</td><td>43.3</td></tr> <tr><td>5</td><td>52</td><td>57.8</td></tr> <tr><td>6</td><td>58.5</td><td>65</td></tr> <tr><td>7</td><td>65</td><td>72.2</td></tr> <tr><td>8</td><td>13</td><td>14.4</td></tr> <tr><td>9</td><td>26</td><td>28.9</td></tr> <tr><td>10</td><td>39</td><td>43.3</td></tr> <tr><td>11</td><td>52</td><td>57.8</td></tr> <tr><td>12</td><td>78</td><td>86.7</td></tr> <tr><td>13</td><td>104</td><td>115.6</td></tr> <tr><td>14</td><td>117</td><td>130</td></tr> <tr><td>15</td><td>130</td><td>144.4</td></tr> </tbody> </table>	MCS Index ¹	GI ² = 800 ns	GI = 400 ns	20-MHz Rate (Mbps)	20-MHz Rate (Mbps)	0	6.5	7.2	1	13	14.4	2	19.5	21.7	3	26	28.9	4	39	43.3	5	52	57.8	6	58.5	65	7	65	72.2	8	13	14.4	9	26	28.9	10	39	43.3	11	52	57.8	12	78	86.7	13	104	115.6	14	117	130	15	130	144.4
MCS Index ¹	GI ² = 800 ns		GI = 400 ns																																																			
	20-MHz Rate (Mbps)	20-MHz Rate (Mbps)																																																				
0	6.5	7.2																																																				
1	13	14.4																																																				
2	19.5	21.7																																																				
3	26	28.9																																																				
4	39	43.3																																																				
5	52	57.8																																																				
6	58.5	65																																																				
7	65	72.2																																																				
8	13	14.4																																																				
9	26	28.9																																																				
10	39	43.3																																																				
11	52	57.8																																																				
12	78	86.7																																																				
13	104	115.6																																																				
14	117	130																																																				
15	130	144.4																																																				

Item	Specification							
	802.11ac data rates on 5 GHz:							
	MCS Index	Spatial Streams	GI = 800 ns			GI = 400 ns		
			20-MHz Rate (Mbps)	40-MHz Rate (Mbps)	80-MHz Rate (Mbps)	20-MHz Rate (Mbps)	40-MHz Rate (Mbps)	80-MHz Rate (Mbps)
	0	1	6.5	13.5	29.3	7.2	15	32.5
	1	1	13	27	58.5	14.4	30	65
	2	1	19.5	40.5	87.8	21.7	45	97.5
	3	1	26	54	117	28.9	60	130
	4	1	39	81	175.5	43.3	90	195
	5	1	52	108	234	57.8	120	260
	6	1	58.5	121.5	263.3	65	135	292.5
	7	1	65	135	292.5	72.2	150	325
	8	1	78	162	351	86.7	180	390
	9	1	–	180	390	–	200	433.3
	0	2	13	27	58.5	14.4	30	65
	1	2	26	54	117	28.9	60	130

	2	2	39	81	175.5	43.3	90	195
	3	2	52	108	234	57.8	120	260
	4	2	78	162	351	86.7	180	390
	5	2	104	216	468	115.6	240	520
	6	2	117	243	526.5	130	270	585
	7	2	130	270	585	144.4	300	650
	8	2	156	324	702	173.3	360	780
	9	2	–	360	780	–	400	866.7

Item	Specification	
Available transmit power settings	2.4 GHz 20 dBm (100 mW) 17 dBm (50 mW) 14 dBm (25 mW) 11 dBm (12.5 mW) 8 dBm (6.25 mW) 5 dBm (3.13 mW) 2 dBm (1.56 mW) -1 dBm (0.78 mW)	5 GHz 20 dBm (100 mW) 17 dBm (50 mW) 14 dBm (25 mW) 11 dBm (12.5 mW) 8 dBm (6.25 mW) 5 dBm (3.13 mW) 2 dBm (1.56 mW) -1 dBm (0.78mW)

Note: The maximum power setting will vary by channel and according to individual country regulations. Refer to the product documentation for specific details.

Integrated antennas	<ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz, gain 2 dBi • 5 GHz, gain 4 dBi
Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> • 1 x 10/100/1000BASE-T autosensing (RJ-45), Power over Ethernet (PoE) • Management console port (RJ-45)

Item	Specification
Input power requirements	<ul style="list-style-type: none"> • Power injector: AIR-PWRINJ5= or AIR-PWRINJ6=
Powering options	<ul style="list-style-type: none"> • 802.3af/at Ethernet switch • Optional Cisco power injectors (AIR-PWRINJ5=, AIR-PWRINJ6=)
Power draw	<ul style="list-style-type: none"> • 8.3W (maximum, on PoE)

Table 3. RF Specifications

Transmit Power and Receive Sensitivity (1815i)					
			2.4-GHz Radio	5-GHz Radio	
	Spatial Streams	Total TX Power (dBm)	RX Sensitivity (dBm)	Total TX Power (dBm)	RX Sensitivity (dBm)
802.11/11b					
1 Mbps	1	17	-98	NA	NA
11 Mbps	1	17	-89	NA	NA
802.11a/g					
6 Mbps	1	20	-94	17	-94
24 Mbps	1	20	-87	20	-87
54 Mbps	1	20	-78	18	-78
802.11n HT20					
MSC0	1	20	-93	20	-93
MSC4	1	20	-83	18	-82
MSC7	1	20	-75	16	-75
MSC8	2	20	-90	20	-90
MSC12	2	20	-80	18	-79
MSC15	2	20	-72	16	-72
802.11ac VHT20					
MSC0	1			20	-93
MSC4	1			18	-82
MSC7	1			16	-75
MSC8	1			15	-71
MSC0	2			20	-90
MSC4	2			18	-79
MSC7	2			16	-72
MSC8	2			15	-68



Americas Headquarters
Cisco Systems, Inc.
San Jose, CA

Asia Pacific Headquarters
Cisco Systems (USA) Pte. Ltd.
Singapore

Europe Headquarters
Cisco Systems International BV Amsterdam,
The Netherlands

Cisco has more than 200 offices worldwide. Addresses, phone numbers, and fax numbers are listed on the Cisco Website at www.cisco.com/go/offices.

Cisco and the Cisco logo are trademarks or registered trademarks of Cisco and/or its affiliates in the U.S. and other countries. To view a list of Cisco trademarks, go to this URL: www.cisco.com/go/trademarks. Third party trademarks mentioned are the property of their respective owners. The use of the word partner does not imply a partnership relationship between Cisco and any other company. (1110R)

Printed in USA

C78-738585-02 12/17

© 2017 Cisco and/or its affiliates. All rights reserved. This document is Cisco Public Information.

Page 9 of 9

8.2.2 Wi-Fi de Exterior

Nota: Solo se ha extraído la información importante para la realización del presente documento. El datasheet completo se puede obtener en el enlace: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1540-series/datasheet-c78-738585.pdf>



Data Sheet

Cisco Aironet 1540 Series Outdoor Access Points



Cisco® Aironet® 1540 Series outdoor access points offer the latest 802.11ac Wave 2 functions in a rugged, ultra-low-profile housing that service providers and enterprises can deploy easily.

The Cisco Aironet 1540 Series is ideal for applications requiring rugged outdoor Wi-Fi coverage and supports the latest 802.11ac Wave 2 radio standard. Housed in a compact, aesthetically pleasing, easy-to-deploy package, the 1540 Series offers flexible deployment options for service providers and enterprise networks that need the fastest links possible for mobile outdoor clients (smartphones, tablets, and laptops) and wireless backhaul. The 1540 Series access points give network operators the flexibility to balance their desired wireless coverage with their need for easy deployment.

Whether deployed as a traditional access point or a wireless mesh access point, the 1540 Series provides the throughput capacity needed for today's bandwidth-hungry devices.

Features and Benefits

By adhering to the 802.11ac Wave 2 standard, the 1540 Series provides a data rate of up to 867 Mbps on the 5-GHz radio. This exceeds the data rates offered by access points that support the 802.11n standard. It also enables a total aggregate dual-radio data rate of up to 1 Gbps. This provides the necessary foundation for enterprise and service provider networks to stay ahead of the performance expectations and needs of their wireless users.

In recent years corporate users have increasingly preferred wireless access as the form of network connectivity due to its convenience. With this shift, there is an expectation that wireless should not slow down users' day-to-day work, but should enable a high-performance experience. The 1540 Series delivers this performance with highly secure and reliable wireless connections for mobile end users.

Table 1 lists the features and benefits of the 1540 Series.

Table 1. Features and Benefits of Cisco Aironet 1540 Series

Feature	Benefit
Compact size	Enables deployment of the access point where it's needed. The 1540 Series easily mounts to walls or light poles without disturbing the aesthetics of the area.
802.11ac Wave 2 radio	Provides up to 867-Mbps data rates with 2 x 2 multiuser multiple-input, multiple-output (MU-MIMO) with up to two spatial streams.
Multiuser MIMO (MU-MIMO)	Allows transmission of data to multiple 802.11ac Wave 2-capable clients simultaneously to improve client experience. Prior to the 802.11ac Wave 2 standard, access points could transmit data to only one client at a time, typically referred to as single-user MIMO.
Flexible deployment modes	Allows for deployment in a variety of ways, including as traditional access points and in mesh networks. The access points can also be deployed with the Cisco Mobility Express Solution. This deployment is ideal for small to medium-sized networks that require 50 or fewer access points without a physical controller. All deployment modes are easy to set up and configure.

Product Specifications

Table 2 lists the specifications of the 1540 Series access points.

Table 2. Specifications

Item	Specifications							
802.11ac Wave 1 and 2 capabilities	<ul style="list-style-type: none"> • 1542I/D: 2 x 2 MIMO with two spatial streams • Multiuser and single-user MIMO • Maximal ratio combining (MRC) • 802.11ac beamforming (transmit beamforming) • 20-, 40-, and 80-MHz channels • PHY data rates up to 867 Mbps (80 MHz in 5 GHz) • Packet aggregation: A-MPDU (Tx/Rx) and A-MSDU (Tx/Rx) • 802.11 dynamic frequency selection (DFS) • Cyclic-shift-diversity (CSD) support 							
802.11n (and related) capabilities	<ul style="list-style-type: none"> • 1542I/D: 2 x 2 MIMO with two spatial streams • MRC • 20- and 40-MHz channels (40 MHz in 5 GHz) • PHY data rates up to 300 Mbps • Packet aggregation: A-MPDU (Tx/Rx) and A-MSDU (Tx/Rx) • 802.11 DFS • CSD support 							
Data rates supported	802.11a: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, and 54 Mbps 802.11b/g: 1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, and 54 Mbps 802.11n data rates on 2.4 and 5 GHz:							
	MCS Index	GI = 800 ns			GI = 400 ns			
		20-MHz Rates (Mbps)	40-MHz Rates (Mbps)	20-MHz Rates (Mbps)	40-MHz Rates (Mbps)			
	0	6.5	13.5	7.2	15			
	1	13	27	14.4	30			
	2	19.5	40.5	21.7	45			
	3	26	54	28.9	60			
	4	39	81	43.3	90			
	5	52	108	57.8	120			
	6	58.5	121.5	65	135			
	7	65	135	72.2	150			
	8	13	27	14.4	30			
	9	26	54	28.9	60			
	10	39	81	43.3	90			
	11	58.5	108	57.8	120			
	12	78	162	86.7	180			
	13	104	216	115.6	240			
	14	117	243	130	270			
	15	130	270	144.4	300			
	802.11ac Data Rates (5 GHz)							
	Spatial Streams	MCS	GI = 800 ns			GI = 400 ns		
			20 MHz	40 MHz	80 MHz	20 MHz	40 MHz	80 MHz
	1	0	6.5	13.5	29.3	7.2	15	32.5
	1	1	13	27	58.5	14.4	30	65
	1	2	19.5	40.5	87.8	21.7	45	97.5
	1	3	26	54	117	28.9	60	130
	1	4	39	81	175.5	43.3	90	195
	1	5	52	108	234	57.8	120	260
	1	6	58.5	121.5	263.3	65	135	292.5
	1	7	65	135	292.5	72.2	150	325

Item	Specifications							
	1	7	65	135	292.5	72.2	150	325
	1	8	78	162	351	86.7	180	390
	1	9	–	180	390	–	200	433.3
	2	0	13	27	58.5	14.4	30	65
	2	1	26	54	117	28.9	60	130
	2	2	39	81	175.5	43.3	90	195
	2	3	52	108	234	57.8	120	260
	2	4	78	162	351	86.7	180	390
	2	5	104	216	488	115.6	240	520
	2	6	117	243	526.5	130	270	585
	2	7	130	270	585	144.4	300	650
	2	8	156	324	702	173.3	360	780
	2	9	–	360	780	–	400	866.7
Frequency band and 20-MHz operating channels (regulatory domains)	A: 2.412 to 2.462 GHz, 11 channels 5.280 to 5.320 GHz, 3 channels 5.500 to 5.580 GHz, 5 channels 5.680 to 5.700 GHz, 3 channels E: 2.412 to 2.472 GHz, 13 channels 5.500 to 5.580 GHz, 5 channels 5.680 to 5.700 GHz, 3 channels							

Nota: España pertenece al dominio E. <https://www.cisco.com/go/aironet/compliance>

Item	Specifications					
Receive sensitivity	Transmit Power and Receive Sensitivity (1542i & 1542D)					
			2.4 GHz Radio		5 GHz Radio	
		Spatial Streams	Total TX Power (dBm)	RX Sensitivity (dBm)	Total TX Power (dBm)	RX Sensitivity (dBm)
	802.11/11b					
	1 Mbps	1	27	-100	NA	NA
	11 Mbps	1	27	-92	NA	NA
	802.11a/g					
	6 Mbps	1	27	-95	25	-93
	24 Mbps	1	27	-89	25	-87
	54 Mbps	1	25	-79	24	-77
	802.11n HT20					
	MCS0	1	27	-95	25	-92
	MCS4	1	27	-84	25	-82
	MCS7	1	25	-76	23	-74
	MCS8	2	27	-94	25	-91
	MCS12	2	27	-82	25	-80
	MCS15	2	25	-74	23	-72
	802.11ac VHT20					
	MCS0	1			25	-92
	MCS4	1			24	-82
	MCS7	1			21	-74
	MCS8	1			20	-70
	MCS0	2			25	-91
MCS4	2			24	-80	
MCS7	2			21	-72	
MCS8	2			20	-68	

Item	Specifications				
Maximum conducted transmit power	<table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;">1542I</td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz: 27 dBm with 2 antennas • 5 GHz: 25 dBm with 2 antennas </td> <td style="vertical-align: top;">1542D</td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz: 27 dBm with 2 antennas • 5 GHz: 25 dBm with 2 antennas </td> </tr> </table>	1542I	<ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz: 27 dBm with 2 antennas • 5 GHz: 25 dBm with 2 antennas 	1542D	<ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz: 27 dBm with 2 antennas • 5 GHz: 25 dBm with 2 antennas
1542I	<ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz: 27 dBm with 2 antennas • 5 GHz: 25 dBm with 2 antennas 	1542D	<ul style="list-style-type: none"> • 2.4 GHz: 27 dBm with 2 antennas • 5 GHz: 25 dBm with 2 antennas 		
Note: The maximum power setting will vary by channel and according to individual country regulations. Refer to the product documentation for specific details.					
Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> • WAN port 10/100/1000BASE-T Ethernet, autosensing (RJ-45), PoE in • Management console port (RJ-45) • Multicolor LED/Reset button 				
Uplink options	Ethernet and wireless mesh				
Environmental	<p>Operating temperature:</p> <ul style="list-style-type: none"> • -40° to 65°C (-40° to 149°F) ambient air with no solar loading • -40° to 55°C (-40° to 131°F) ambient air with solar loading • Storage temperature: -40° to 85°C (-40° to 185°F) <p>Wind resistance:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Up to 100-mph sustained winds • Up to 165-mph wind gusts 				
Power consumption	1542I/D 13W				
Compliance	<p>Safety</p> <ul style="list-style-type: none"> • UL60950, 2nd Edition • CAN/CSA-C22.2 No. 60950, 2nd Edition • IEC 60950, 2nd Edition • EN 60950, 2nd Edition <p>Security</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wireless bridging/mesh • X.509 digital certificates • MAC address authentication • Advanced Encryption Standard (AES) 				
	<p>Wireless Access</p> <ul style="list-style-type: none"> • 802.11i, Wi-Fi Protected Access 2 (WPA2), and WPA • 802.1X authentication, including Extensible Authentication Protocol (EAP) and Protected EAP (EAP-PEAP), EAP Transport Layer Security (EAP-TLS), EAP-Tunneled TLS (EAP-TTLS), EAP-Subscriber Identity Module (EAP-SIM), and Cisco LEAP • VPN pass-through • IP Security (IPsec) • Layer 2 Tunneling Protocol (L2TP) • MAC address filtering 				
Warranty	1-year limited hardware warranty				



Americas Headquarters
Cisco Systems, Inc.
San Jose, CA

Asia Pacific Headquarters
Cisco Systems (USA) Pte. Ltd.
Singapore

Europe Headquarters
Cisco Systems International BV Amsterdam,
The Netherlands

Cisco has more than 200 offices worldwide. Addresses, phone numbers, and fax numbers are listed on the Cisco Website at www.cisco.com/go/offices.

Cisco and the Cisco logo are trademarks or registered trademarks of Cisco and/or its affiliates in the U.S. and other countries. To view a list of Cisco trademarks, go to this URL: www.cisco.com/go/trademarks. Third party trademarks mentioned are the property of their respective owners. The use of the word partner does not imply a partnership relationship between Cisco and any other company. (1110R)

Printed in USA

C78-738585-02 12/17

© 2017 Cisco and/or its affiliates. All rights reserved. This document is Cisco Public Information.

Page 9 of 9