

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Reconfiguración de un radioenlace por la liberación de la banda de 26 GHz para la tecnología 5G.”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Lucía Martínez Palomo

Tutor/a:

**M^a Desamparados Girona Coma
Rodrigo Ibáñez Guantes**

GANDIA, 2021

Resumen

En este trabajo fin de grado se ha atendido la petición de un cliente de realizar el cambio de banda o *swap* de un radioenlace. La razón de esta demanda es la necesaria liberación de la banda de 26 GHz (24.25-27.5 GHz), a fin de poder implementar próximamente los servicios necesarios para la tecnología 5G *New Radio* en estas frecuencias.

Para ello, se han observado primero las características del diseño en 26 GHz y las condiciones expuestas por el cliente. Después de esto, se han planteado tres diseños posibles haciendo uso de la herramienta iQ-link. Se han estudiado las peculiaridades de cada uno y, tras una comparación de las tres propuestas, se ha escogido el más adecuado, basándose en distintos criterios.

Finalmente, se ha realizado un presupuesto del equipamiento necesario para la integración del radioenlace en la red.

Palabras clave: radioenlace, *swap*, *New Radio*, 5G.

Abstract

This end-of-degree project has attended the request of a client to perform the swap of a radiolink. The main reason for this demand is the required release of the 26 GHz band (24.25-27.5GHz) in order to implement in the near future the necessary services for the 5G New Radio technology in this band.

Thus, the characteristics of the design in 26 GHz and the conditions exposed by the client have been studied. Then, three possible designs have been raised using the iQ-link tool. The peculiarities of each one have been studied, and after comparing them, according to different criteria, the most suitable one has been chosen.

Finally, a budget has been made for the necessary equipment for the integration of the radiolink in the network.

Key words: radiolink, *swap*, *New Radio*, 5G.

Índice

1. Introducción y objetivos	11
1.1. Introducción	11
1.2. Objetivos	11
1.3. Estructura	11
1.4. Introducción a la red de transmisión	12
1.4.1. Transmisión previa a 5G	12
1.5. Introducción a la tecnología 5G	13
1.5.1. 5G Non-Standalone (5G NSA)	14
1.5.2. 5G Standalone (5G SA)	14
1.6. Acondicionamiento de la red para la introducción de 5G New Radio	15
2. Desarrollo teórico	17
2.1. Parámetros de diseño de un radioenlace	17
2.1.1. Emplazamientos y ángulo de apuntamiento	17
2.1.2. Bandas de frecuencia y canalización	17
2.1.3. Capacidad y modulación	22
2.1.4. Parámetros de degradación	24
2.2. Configuraciones posibles de un radioenlace	27
2.2.1. 1+0	28
2.2.2. 1+1	28
2.2.3. 2+0 (XPIC)	28
3. Desarrollo práctico	29
3.1. Introducción	29
3.2. Diseño actual en 26 GHz	29
3.3. Diseño en 38 GHz	30
3.3.1. Banda de trabajo	30
3.3.2. Capacidad, ancho de banda, modulación y equipos	30
3.3.3. Antenas	31
3.3.4. Potencia y configuración radio	31
3.3.5. Corrección	32
3.3.6. Disponibilidad ante lluvia	33
3.3.7. Interferencias	34
3.4. Diseño en 23 GHz	34
3.4.1. Banda de trabajo	34
3.4.2. Capacidad, ancho de banda, modulación y equipos	34
3.4.3. Antenas	35
3.4.4. Potencia y configuración radio	35
3.4.5. Corrección	35
3.4.6. Disponibilidad ante lluvia	36
3.4.7. Interferencias	36

3.5.	Diseño en 18 GHz	38
3.5.1.	Banda de trabajo	38
3.5.2.	Capacidad, ancho de banda, modulación y equipos	38
3.5.3.	Antenas	39
3.5.4.	Potencia y configuración radio	39
3.5.5.	Corrección	39
3.5.6.	Disponibilidad ante lluvia	40
3.5.7.	Interferencias	40
3.6.	Elección del diseño	41
3.7.	Elección de equipos	42
3.8.	Presupuesto	44
4.	Conclusiones	45
4.1.	Conclusiones	45
4.2.	Futuras líneas de trabajo	45
4.2.1.	Proceso completo del cambio de banda de un radioenlace	45

Índice de figuras

1.1. Red de Transmisión.	12
1.2. Uso actual de la banda de 26 GHz [4].	15
1.3. Arquitectura de la red 5G.	16
2.1. Canalización banda 80 GHz.	19
2.2. Canalización banda 38 GHz.	19
2.3. Canalización banda 23 GHz.	20
2.4. Canalización banda 18 GHz.	20
2.5. Canalización banda 15 GHz.	21
2.6. Canalización banda 13 GHz.	21
2.7. Obstrucción causada por la tierra [10].	24
2.8. Pérdidas de difracción por aristas [10].	25
2.9. Pérdidas de difracción por aristas [12].	26
3.1. Perfil del vano.	30
3.2. Apartado radio del diseño inicial en 38 GHz.	31
3.3. Configuración radio del diseño inicial en 38 GHz.	32
3.4. Configuración radio tras aumentar el ancho de banda a 56 MHz.	32
3.5. Selección de la nueva antena de 0.6 m.	33
3.6. Configuración radio tras aumentar el tamaño de antena a 0.6 m.	33
3.7. Configuración radio al disminuir la potencia a 18 dBm.	33
3.8. Disponibilidad ante lluvia tras aumentar a 20 dBm.	34
3.9. Cálculo de interferencias en banda 38 GHz.	34
3.10. Apartado radio del diseño inicial en 23 GHz.	35
3.11. Configuración radio del diseño inicial en 23 GHz.	35
3.12. Configuración radio tras aumentar el tamaño de antena a 0.6 m.	36
3.13. Configuración radio tras disminuir la potencia a 18 dBm.	36
3.14. Disponibilidad ante lluvia con potencia de 18 dBm.	36
3.15. Cálculo de casos interferentes en banda 23 GHz y polarización horizontal.	37
3.16. Análisis de la degradación en el canal CH5 con polarización horizontal.	37
3.17. Análisis de interferencias en el canal CH5 con polarización horizontal.	37
3.18. Cálculo de casos interferentes en banda 23 GHz y polarización vertical.	38
3.19. Análisis de la degradación en el canal CH5 con polarización vertical.	38
3.20. Análisis de interferencias en el canal CH5 con polarización vertical.	38
3.21. Configuración radio del diseño inicial en 18 GHz.	39
3.22. Configuración radio tras aumentar el tamaño de antena a 0.6 m.	39
3.23. Configuración radio tras disminuir la potencia a 17 dBm.	40
3.24. Disponibilidad ante lluvia con potencia de 17 dBm.	40
3.25. Cálculo de interferencias en banda 18 GHz.	41
3.26. Análisis de la degradación en el canal CH4 con polarización horizontal.	41
3.27. Análisis de interferencias en el canal CH4 con polarización horizontal.	41

3.28. Estado actual en red del radioenlace RE diseñado visto en el gestor.	43
3.29. Vista en gestor del equipo origen (RTN 980) del Site A.	43
3.30. Vista en gestor del equipo destino (RTN 905 2E) del Site B.	43

Índice de tablas

2.1. Bandas de frecuencia, distancia recomendada y máximo ancho de banda disponible. . .	18
2.2. Capacidades disponibles con ISV3 y sin XPIC.	22
2.3. Capacidades disponibles con ISV3 y con XPIC.	23
2.4. Capacidades disponibles con ISM6 y sin XPIC.	23
2.5. Capacidades disponibles con ISM6 y con XPIC.	23
3.1. Características del diseño en 26 GHz.	30
3.2. Comparativa de los diseños en 38 GHz, 23 GHz y 18 GHz.	41
3.3. Listado de precios aproximados de los equipos necesarios.	44

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

El sector de las telecomunicaciones, aunque en un segundo plano, ha jugado un papel crucial en nuestra forma de vida durante los últimos meses. Videollamadas, teletrabajo, redes sociales, plataformas de streaming, compras online... han sido sólo algunos de los servicios que hemos demandado día tras día a la red. Una red que además se encontraba en pleno desarrollo y adecuación para la adopción de la quinta generación de sistemas de comunicaciones móviles (5G).

Si bien es cierto que estos servicios se llevan solicitando desde varios años atrás, la situación vivida ha hecho que el tráfico se haya multiplicado de forma vertiginosa. Y no sólo ha aumentado la cantidad de datos transmitidos, exigiendo a la red una mayor capacidad, sino que también lo han hecho la cantidad de dispositivos conectados, así como la demanda de alta velocidad por parte de los usuarios [1].

Por todo esto, hemos podido comprobar que cada día es más necesaria una red que soporte estos requerimientos que ya se venían adelantando con la tecnología 5G.

1.2. Objetivos

En este proyecto se estudiará la demanda de un cliente para realizar el cambio de banda de un radioenlace planificado en la banda de 26 GHz. El motivo de este trabajo surge por la necesidad de la liberación de dicha banda antes del 31 de diciembre de 2021, establecida por la Nota de Utilización Nacional UN-92 del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [2].

El principal objetivo de este trabajo es realizar el *swap* del radioenlace escogido haciendo uso del software iQ-link, de tal forma que cumpla con los requisitos exigidos por el cliente.

Se investigarán también las principales características de la tecnología 5G New Radio, además de añadir un breve desarrollo sobre cómo será su introducción en la red actual, con el fin de comprender mejor el por qué existe la necesidad de hacer uso de esta banda de frecuencias.

Asimismo, se analizarán los parámetros necesarios que se deben tener en cuenta a la hora de hacer el diseño de un radioenlace, con objeto de entender las bases teóricas que utiliza el software para el planteamiento del nuevo vano.

1.3. Estructura

Este trabajo se divide en cuatro capítulos. En este primer capítulo, además de haber introducido el tema del que tratará el trabajo y haber explicado la estructura que seguirá, se presentarán también los conceptos básicos relacionados con 5G y el estado actual de la red, así como su adecuación para esta tecnología.

En el segundo capítulo se desarrollarán los conceptos teóricos imprescindibles para entender el diseño de un radioenlace de servicio fijo punto a punto.

En el tercer capítulo se realizarán tres propuestas de diseño con ayuda de iQ-link, se compararán y se decidirá cuál es la mejor solución de las tres proposiciones, además de calcular un presupuesto aproximado del material utilizado en el trabajo.

Finalmente, en el cuarto capítulo se cierra la memoria con una conclusión de las ideas principales del trabajo.

1.4. Introducción a la red de transmisión

Se denomina red de transmisión al conjunto de equipos que permiten la comunicación entre los usuarios fijos y las estaciones base, y las centrales de los operadores responsables de la gestión del servicio, así como los medios físicos y lógicos que los conexionan.

Actualmente, estamos ante una situación de cambio, ya que se están incorporando progresivamente a la red los equipos y la tecnología necesaria para la implementación de 5G. Por ello, estudiaremos el estado de la red tal y como se conoce hasta ahora, así como los cambios que se han de realizar para su adecuación a esta nueva tecnología.

1.4.1. Transmisión previa a 5G

La red está formada por la red de radio, que son las conexiones entre los usuarios móviles hasta las estaciones base, y por la red de transmisión, vista en la Figura 1.1, que de menor a mayor nivel jerárquico, está compuesta por:

- Red de *Backhaul*: constituida por la red de última milla, compuesta de las conexiones (radioenlaces, fibra, cobre) que unen las estaciones base a los primeros equipos agregadores de tráfico; y la red de agregación, que es el conjunto de equipos encargados de recibir los datos procedentes de la última milla, agregar el tráfico y concentrarlo en tramas hasta llegar a los concentradores de tráfico (RNC, BSC, BRAS) de la red troncal.
- Red troncal o de *core*: se ocupa de aglutinar todos los datos de los usuarios de la red desde los concentradores de tráfico hasta las centrales de conmutación.

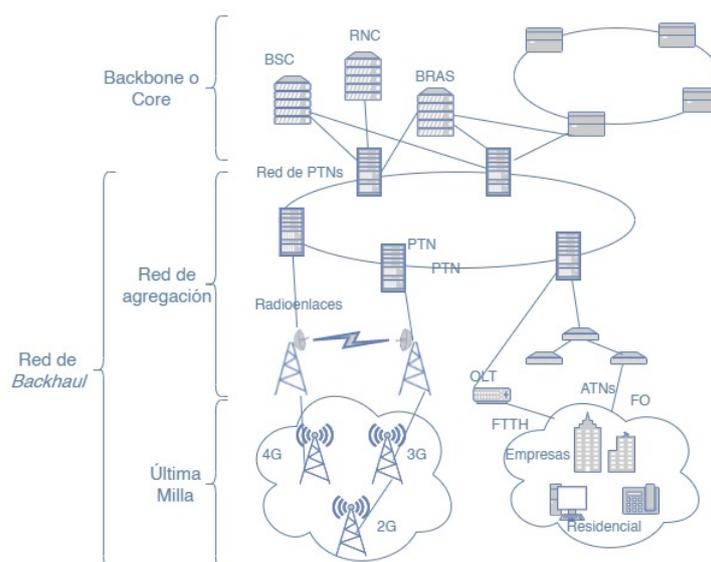


Figura 1.1: Red de Transmisión.

En este trabajo nos centraremos en el estudio de la red de *backhaul*, ya que el enlace que se diseñará pertenece a esta parte de la red.

Backhaul en sistemas celulares

GSM (Global System for Mobile communications)

En el sistema GSM, la red de acceso estaba basada en la conmutación de circuitos y hacía uso de multiplexación por división de tiempo o TDM (*Time Division Multiplexing*). Por otra parte, la última milla utilizaba jerarquía digital pliesiócrona o PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) para poder enviar múltiples canales telefónicos sobre un mismo medio, generalmente cable coaxial o a través de radioenlaces de microondas. En cuanto a la red de agregación, empleaba jerarquía digital síncrona o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) sobre fibra óptica, y en menor medida, también sobre radio.

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

En la red de acceso del sistema UMTS se comienza utilizando ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) como tecnología de transporte, ya que era la más flexible y madura que permitía calidad de servicio (QoS) para el despliegue de redes multiservicio. Por lo tanto, fue la primera en utilizar conmutación de paquetes, además de poder emular la conmutación de circuitos de los E1s. La red de agregación combina ATM y SDH sobre fibra y radioenlaces.

LTE (Long Term Evolution)

Este sistema es el primero en migrar el tráfico de la red de acceso a IP con el fin de obtener altas capacidades. De esta forma, la última milla usa también IP e incluye equipos con interfaces Ethernet. La red de agregación utiliza conmutación de etiquetas multiprotocolo, mejor conocido como MPLS (*Multiprotocol Label Switching*), con el fin de unificar los distintos tipos de datos transmitidos por la misma red, mejorando así la eficiencia de las redes de conmutación IP. Además, LTE permite la posibilidad de la integración de las tecnologías GSM y UMTS en la red de backhaul.

1.5. Introducción a la tecnología 5G

En abril de 2019, 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) lanzó la primera versión de la estandarización hacia la red 5G NR (*New Radio*) con la publicación de la versión *Release 15* [3]. Ésta, exponía las principales claves de 5G:

Flexibilidad en el espectro

En 5G es necesario disponer de flexibilidad a la hora de seleccionar la banda de trabajo para poder ofrecer capacidades de hasta 10 Gbps. Se usará desde la banda de ondas milimétricas (24-39 GHz) hasta las frecuencias más bajas (0.6-2.16 GHz), pasando por las ondas centimétricas (2.5-3.8 GHz).

Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) y Beamforming

Se incrementa el número de antenas para tener un mayor número de haces y más estrechos, pudiendo así ajustar la potencia y la intensidad de la señal de cada uno en función de las necesidades del dispositivo conectado. Así, se mejora la relación señal a ruido (SNR) y por tanto, la calidad de servicio (QoS) ofrecida. Además, se estima que de esta forma se pueda reducir hasta un 90 % el consumo de energía de la red.

Multi-conectividad

La multiconectividad se refiere al uso concurrente de múltiples rutas de comunicaciones independientes, nodos, puntos de acceso o estaciones base para la transmisión de datos a un equipo de usuario, con el fin de obtener ratios de rendimiento o *throughput* de varios gigabits por segundo. Así, se espera una banda ancha mil veces más rápida por unidad de área y una mejora en el rendimiento.

Nueva radio y diseño de trama flexible

La trama de interfaz radio deberá ser capaz de adaptarse a la calidad de servicio y las necesidades requeridas por cada uno de los terminales. Por ejemplo, se podrán utilizar recursos radio instantáneos para aplicaciones de baja latencia, recursos que requieran mayor calidad o recursos con menor capacidad pero con muy poco consumo para dispositivos IoT (*Internet of Things*), y todos ellos compartiendo la misma trama (frecuencia y tiempo).

Arquitectura flexible y distribuida

La red 5G se virtualizará y se ampliará en función de las necesidades del usuario. Aunque este concepto se explicará más adelante, cabe destacar que de esta forma se podrá mejorar la latencia, haciendo que sea cercana a 1 milisegundo, y permitirá mayor capacidad de procesamiento.

Al igual que con las tecnologías móviles anteriores, el lanzamiento de 5G se realizará en varias fases; en este caso concreto, en dos: primero, se introducirá 5G *Non-Standalone (NSA)*, después, como fase intermedia y dentro de 5G NSA se adoptará el compartimiento de espectro dinámico o DSS (*Dynamic Spectrum Sharing*) y finalmente, se implementará 5G *Standalone*, un 5G totalmente independiente de 4G y capaz de cumplir todos los requerimientos de latencia, capacidad y cobertura.

1.5.1. 5G Non-Standalone (5G NSA)

El 5G NSA se basa en la red existente de 4G; es decir, se añaden nodos 5G NR, pero se usa la red LTE, su núcleo, su cobertura y extiende su calidad de servicio, con el fin de hacer más sencilla su introducción. La red prioritaria es la LTE, ya que, además de poder transmitir datos para conexiones 4G, se encarga de la sincronización, por lo que es fundamental la comunicación entre el nodo 4G LTE y el nodo 5G NR.

La conexión del usuario se inicia en LTE, pero una vez se detecta que el terminal soporta 5G, se transmiten los datos desde el *core* 4G hasta el nodo 5G NR y se activan los recursos radio NSA. En caso de pérdida de conexión, se conmuta a 4G. Debido a esto, el principal aporte de 5G NSA no es la baja latencia, sino una mayor velocidad en la tasa de transmisión de datos.

Dynamic Spectrum Sharing (DSS)

DSS es una funcionalidad software que no requiere equipos nuevos, sino que se reutilizan el espectro 4G, las antenas y los módulos radio, sin necesidad de la integración de equipos nuevos. Inicialmente, el espectro se asignaba a 5G de forma estática, ya que no era compatible con las señales de referencia específicas de celda o CRS (*Cell-specific Reference Signal*) del *downlink* LTE. Para resolver esto, se ideó *CRS rate matching*, que permite la transmisión de datos NR asignándolos únicamente en los recursos de tiempo y frecuencia que no están ocupados por CRS LTE. De esta forma, se puede distribuir el espectro de forma dinámica, utilizando acceso múltiple por división de tiempo (TDD) en *downlink* y acceso múltiple por división de frecuencia (FDD) en *uplink*.

1.5.2. 5G Standalone (5G SA)

5G SA permite flexibilidad de la red, resultando en la baja latencia, mayor estabilidad y fiabilidad en la conexión, y mejora en la capacidad y velocidad de transmisión. Para ello, es necesario que tanto la red de transmisión como la de acceso radio sean únicamente 5G, por lo que cuando un terminal se conecta, sólo recibirá datos y control NR.

1.6. Acondicionamiento de la red para la introducción de 5G New Radio

Tal y como se ha explicado anteriormente, 5G exige unos requisitos de capacidad, latencia, velocidad y disponibilidad. Como la adopción de esta tecnología se hace de forma progresiva y teniendo en cuenta el estado de la red actual, es necesario realizar una serie de cambios para poder ir adaptándola gradualmente.

Espectro 5G

Un elemento clave para permitir la amplia cobertura y la diversidad de casos de usos que promete 5G es la utilización de distintas bandas de frecuencias. Así, principalmente se usarán tres:

- Ondas milimétricas: dentro de esta banda, se utilizarán las frecuencias de 24 a 39 GHz, lo que permitirá la utilización de canales con anchos de banda de hasta 800 MHz, traducándose esto en la posibilidad de alcanzar capacidades de hasta 5 Gbps por usuario. El principal problema de estas bandas es el reducido tamaño del rango de cobertura, entre 100 y 150 metros, por lo que sólo se pueden utilizar para dar capacidad en zonas muy concretas. En concreto, en España se utilizará la banda de 26 GHz (24.25-27.50 GHz), regulada por la UN-92, por la cual se establece la autorización de 1 GHz para el uso de esta tecnología; aunque para ello, se ha de liberar previamente de todos los usos actuales del servicio fijo. En la Figura 1.2 se muestran en azul las frecuencias ya disponibles para los servicios de comunicaciones en esta banda.

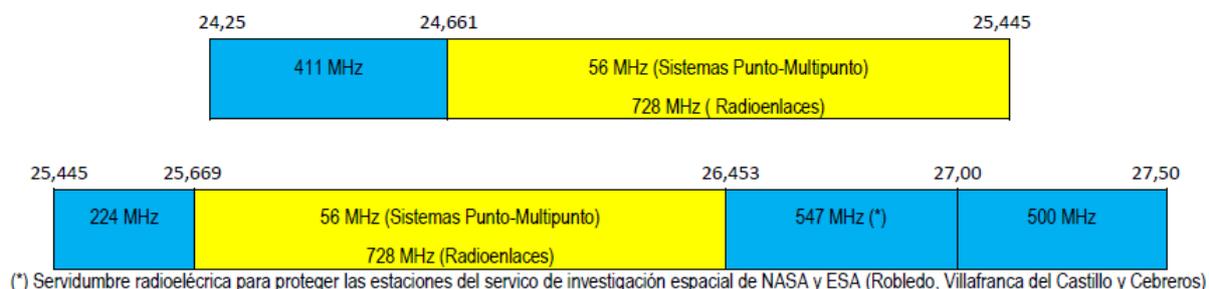


Figura 1.2: Uso actual de la banda de 26 GHz [4].

- Ondas centimétricas: en este rango de frecuencias, se usarán desde 2.5. a 3.8 GHz. El ancho de banda utilizado en esta banda es de 100 MHz, por lo que la capacidad máxima es de unos 2 Gbps. La cobertura va desde 0.5 a 5 kilómetros; en consecuencia, sólo se utiliza en grandes núcleos urbanos.
- Ondas decimétricas: las frecuencias utilizadas en este rango será desde 0.6 hasta 2.16 GHz. Con ellas se pretende dar cobertura, ya que alcanzan entre 5 y 20 kilómetros. La calidad de servicio ofrecida es muy baja, pues los canales tienen un ancho de banda máximo de 10 MHz, con el que se consigue, a lo sumo, 200 Mbps de throughput.

Virtualización

Debido a factores como el procesamiento o el tiempo de propagación de las señales, las latencias de pocos milisegundos que promete 5G son impensables con la arquitectura de red de 4G. Por eso, se han de acercar algunas de las funciones de red al usuario haciendo uso de la tecnología MEC (*Multi-Access Edge Computing*), la cual permite una latencia ultrabaja con un gran ancho de banda, además de acceso en tiempo real a la información de la red. Esto, se consigue moviendo los recursos

de computación o *virtual machines* a servidores que ejecuten funciones del *core* 5G y formen parte de la estación base.

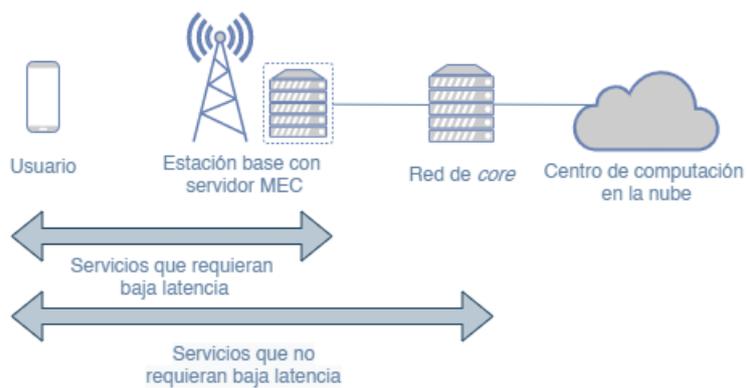


Figura 1.3: Arquitectura de la red 5G.

Capítulo 2

Desarrollo teórico

2.1. Parámetros de diseño de un radioenlace

Se define radioenlace como cualquier conexión entre dos puntos mediante ondas radioeléctricas. Las ondas radioeléctricas son las ondas electromagnéticas de frecuencias por debajo de 3000 GHz capaces de propagarse en el espacio libre. Generalmente, las frecuencias utilizadas en estos enlaces van desde los 800 MHz hasta 80 GHz, aunque se espera que en un futuro se alcance hasta cerca de 170 GHz, debido a los requerimientos de alta capacidad que se prevén.

La propagación en el espacio libre se estudia como un modelo ideal análogo a la propagación en el vacío. Sin embargo, en el entorno terrestre existen factores tales como la presencia de la tierra, la atmósfera y la ionosfera, que pueden alterar la propagación electromagnética, por lo que es esencial conocer cada uno de ellos, así como su magnitud e influencia en las distintas bandas de frecuencia. En este apartado, además de los parámetros que pueden degradar la calidad del enlace, se estudiarán también todos aquellos aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de un radioenlace.

2.1.1. Emplazamientos y ángulo de apuntamiento

A la hora de escoger los emplazamientos de los extremos del radioenlace, así como la altura de las antenas sobre el suelo, será necesario elegir dos ubicaciones entre las cuales exista línea de visión directa (LOS), con el fin de evitar el efecto de difracción. Una manera sencilla de hacer esta comprobación es calculando el perfil del terreno entre los dos puntos.

Además, se habrá de tener en cuenta el ángulo de apuntamiento entre las antenas en cada ubicación, ya que será fundamental para la correcta transmisión de la señal.

2.1.2. Bandas de frecuencia y canalización

Bandas de frecuencia disponibles

Como es sabido, el espectro es un bien escaso, por lo que a la hora de diseñar el radioenlace, se debe comenzar probando con la banda frecuencial que más se ajuste a la longitud del vano, teniendo en cuenta la densidad espectral de la zona, y con el ancho de banda más bajo que consiga ofrecer la capacidad requerida y que cumpla con los criterios de disponibilidad y calidad.

La Subdirección General de Planificación y Gestión del Espectro Radioeléctrico es la responsable de determinar las bandas y canalizaciones disponibles para los servicios fijos de banda ancha. Mediante el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [5] y el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) [6] de la ITU se determina el uso que se reserva a cada una de las bandas de frecuencia en las que se divide el espectro radioeléctrico.

Consultando todos ellos, se dispone que las bandas disponibles para los servicios fijos punto a punto, así como la Nota de Utilización Nacional (UN) de cada una de ellas son las siguientes [7]:

- 2 GHz (UN-48 y UN-89).
- 3.8 - 4.2 GHz (UN-55).
- 5.9 - 6.4 GHz (UN-57).
- 6.4 - 7.1 GHz (UN-57).
- 7.1 - 7.4 GHz (UN-58).
- 7.4 - 7.7 GHz (UN-58).
- 7.7 - 8.3 GHz (UN-59).
- 8.3 - 8.5 GHz (UN-59).
- 10.5 - 10.7 GHz (UN-61).
- 11 GHz (UN-62).
- 13 GHz (UN-64).
- 15 GHz (UN-66).
- 18 GHz (UN-69).
- 21 GHz (UN-71).
- 23 GHz (UN-91).
- 28 GHz (UN-79).
- 31 GHz (UN-149).
- 32 GHz (UN-162).
- 38 GHz (UN-93).
- 50 GHz (UN-125).
- 56 GHz (UN-150).
- 60 GHz (UN-126).
- 64 - 66 GHz (UN-126).
- 70 y 80 GHz (UN-139).

Sin embargo, el cliente no dispone de canales propios en todas estas bandas. Por lo tanto, se mostrará en la Tabla 2.1 las bandas que se pueden utilizar para el diseño, la distancia del vano recomendada en cada una, así como el máximo ancho de banda de los canales concedidos en ellas.

A pesar de que este trabajo trata sobre el vaciado de la banda de 26 GHz, ésta aparece tachada en la tabla para que el lector comprenda el alcance que permite y el ancho de banda de canal disponible, pero se debe tener en cuenta que no se pueden realizar diseños actualmente a estas frecuencias.

Banda de frecuencia	Distancia recomendada	Máximo ancho de banda concedido
80 GHz	~ 3 km	500 MHz
38 GHz	~ 6 km	56 MHz
26 GHz	~ 9 km	28 MHz
23 GHz	~ 10 - 15 km	28 MHz
18 GHz	~ 15 - 20 km	56 MHz
15 GHz	~ 20 - 25 km	28 MHz
13 GHz	> 25 km	56 MHz

Tabla 2.1: Bandas de frecuencia, distancia recomendada y máximo ancho de banda disponible.

Canalizaciones

A continuación se muestran los canales que el cliente dispone en cada banda. Con el fin de preservar su privacidad, se omitirán las frecuencias centrales, así como los nombres de cada uno de los canales.

A pesar de esto, conviene destacar que la importancia de estas figuras no es sólo la frecuencia de los canales, sino también la disposición que tiene cada uno en el espectro, ya que esto también tiene gran relevancia a la hora de realizar el diseño. Por ejemplo, en la banda de 38 GHz, mostrada en la Figura 2.2, se podrá plantear un radioenlace con un ancho de banda de 56 MHz (uniendo los dos canales de 28 MHz) junto con dos radioenlaces con canales de 7 MHz, pero no sería posible plantear un radioenlace de 56 MHz junto con otro de 14 MHz, ya que no son contiguos y no se podrían unir.

80 GHz

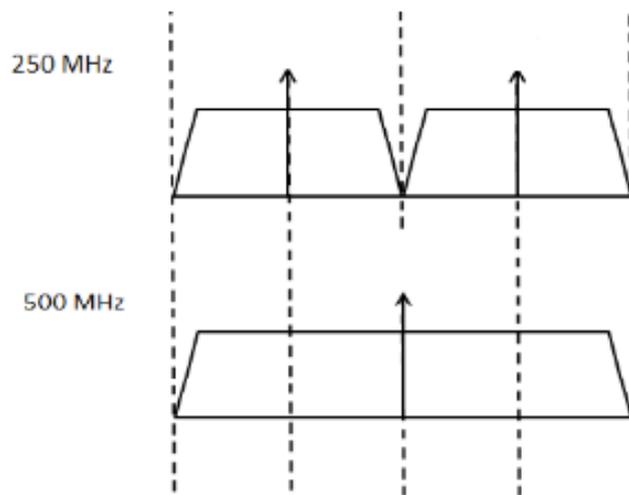


Figura 2.1: Canalización banda 80 GHz.

38 GHz

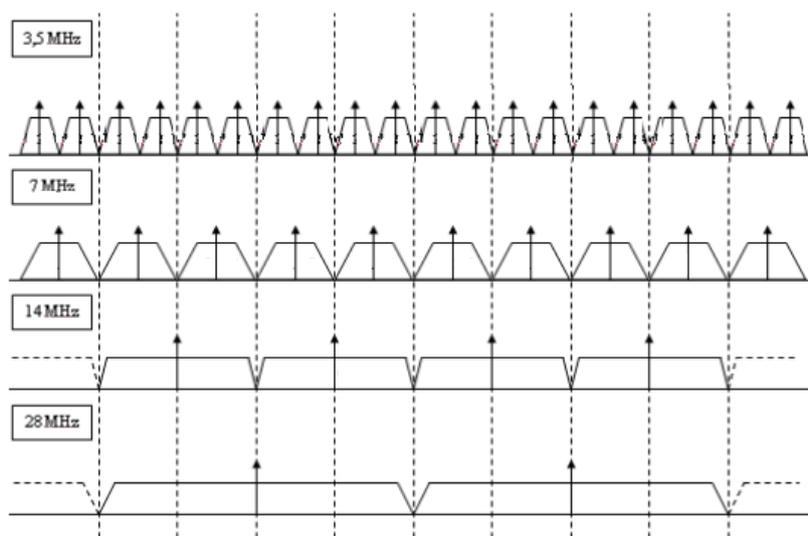


Figura 2.2: Canalización banda 38 GHz.

23 GHz

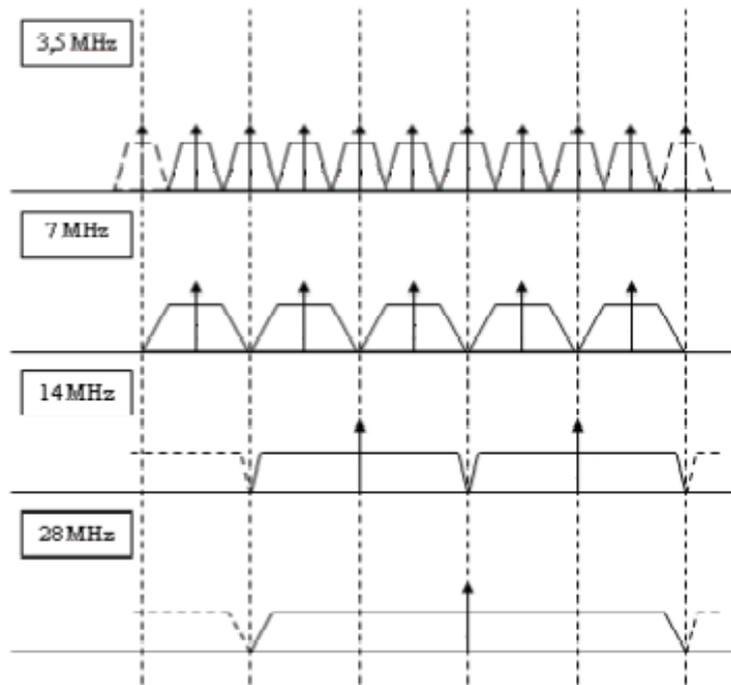


Figura 2.3: Canalización banda 23 GHz.

18 GHz

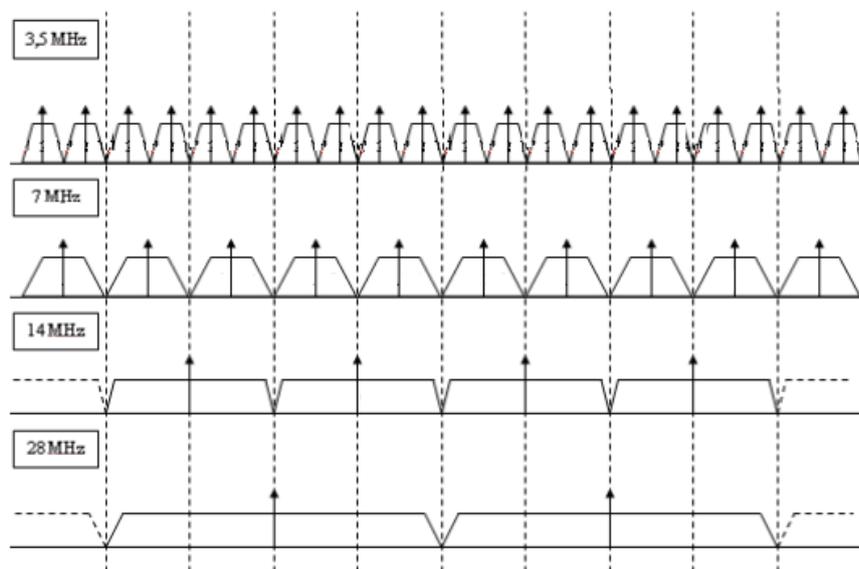


Figura 2.4: Canalización banda 18 GHz.

15 GHz

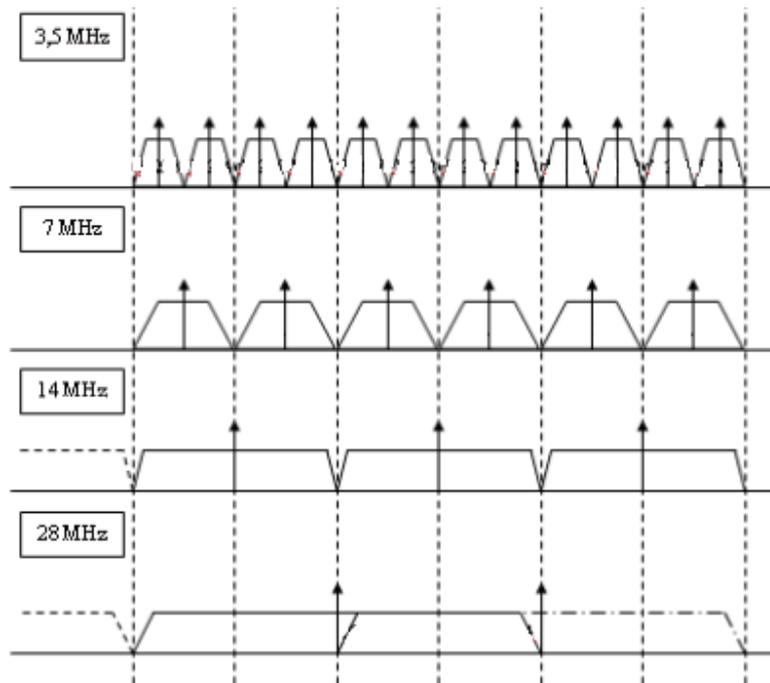


Figura 2.5: Canalización banda 15 GHz.

13 GHz

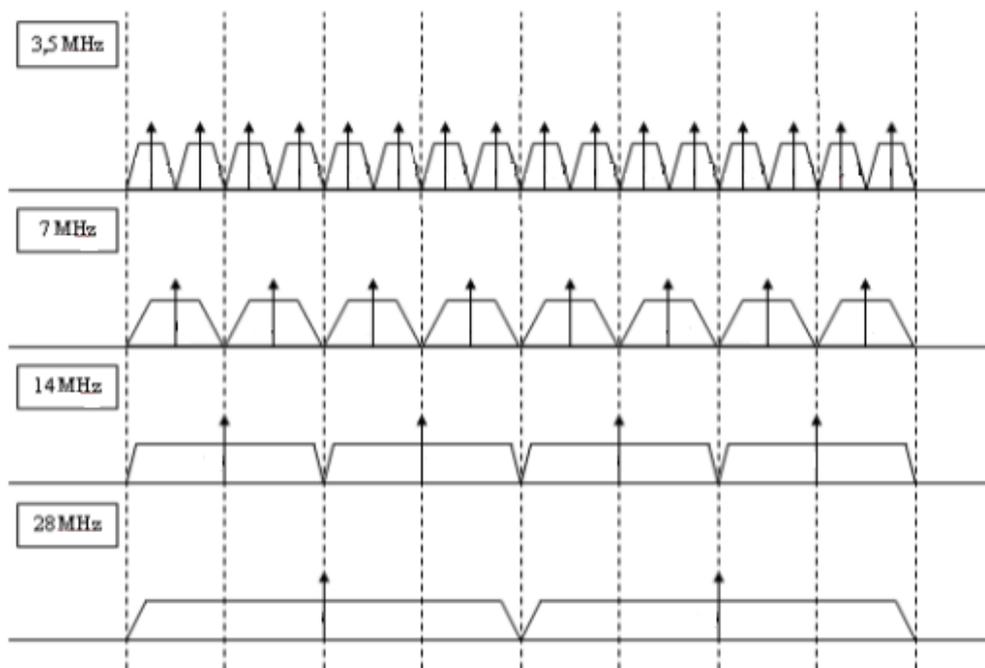


Figura 2.6: Canalización banda 13 GHz.

Frecuencias de transmisión

Los radioenlaces son servicios dúplex, por lo cual, usan una portadora para cada sentido de transmisión. Las frecuencias de estas portadoras se deben elegir teniendo en cuenta que, en las localizaciones donde existan más de un radioenlace, es obligatorio que todos transmitan en la misma semibanda a fin de evitar interferencias.

2.1.3. Capacidad y modulación

La capacidad de un canal de comunicación es la cantidad de información que se puede transmitir por dicho canal. El Teorema de Shannon (ver ecuación 2.1) determina su capacidad máxima e indica que ésta depende del ancho de banda y el ruido que presente.

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (2.1)$$

donde:

C capacidad máxima del canal (bps)

B es el ancho de banda del canal (Hz)

SNR es la relación señal a ruido del canal

El diseño de un radioenlace se puede hacer en función del ancho de banda del canal disponible o bien en función de la capacidad requerida; en ambos casos, teniendo siempre en cuenta que no se supere una tasa de error determinada, relacionada con el ruido del canal.

En este trabajo, se diseñará fijando la capacidad que se desea y, dentro de los valores de las canalizaciones disponibles, se ajustarán el ancho de banda y la modulación utilizada para poder conseguirla. Se puede definir la modulación necesaria en función del ancho de banda disponible, la tarjeta radio y la configuración del radioenlace consultando las Tablas 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5.

ISV3 sin XPIC				
	7 MHz	14 MHz	28 MHz	56 MHz
QPSK Strong	8	17	36	73
QPSK	10	21	42	86
16QAM Strong	17	35	73	148
16QAM	20	41	86	173
32QAM	25	52	110	217
64QAM	32	65	135	273
128QAM	37	77	160	323
256QAM	42	88	183	369
512QAM	45	94	196	395
512QAM Light	48	100	210	423
1024QAM	51*	104	217	447
1024QAM Light		109*	228	481
2048QAM			245	504

*No es posible en 38 GHz

Tabla 2.2: Capacidades disponibles con ISV3 y sin XPIC.

ISV3 con XPIC				
	7 MHz	14 MHz	28 MHz	56 MHz
QPSK	19	39	81	167
16QAM	39	78	167	336
32QAM	47	97	213	421
64QAM	60	122	262	530
128QAM	70	146	310	627
256QAM		165	353	708
512QAM			365	735
1024QAM			417*	840*

*No es posible en 38 GHz

Tabla 2.3: Capacidades disponibles con ISV3 y con XPIC.

ISM6 sin XPIC				
	7 MHz	14 MHz	28 MHz	56 MHz
QPSK	10	20	42	86
16QAM	20	41	86	173
32QAM	25	52	109	217
64QAM	32	65	135	273
128QAM	37	77	160	323
256QAM	43	89	185	373
512QAM	47	99	207	417
1024QAM	51	104	219	450
2048QAM		115	242	502
4096QAM			258*	535*

*No es posible en 38 GHz

Tabla 2.4: Capacidades disponibles con ISM6 y sin XPIC.

ISM6 con XPIC				
	7 MHz	14 MHz	28 MHz	56 MHz
QPSK	19	39	81	167
16QAM	39	78	167	336
32QAM	47	97	211	421
64QAM	60	122	262	530
128QAM	70	146	310	627
256QAM	81	167	357	716
512QAM	91	186	384	776
1024QAM		202	419	846
2048QAM			440*	885*

*No es posible en 38 GHz

Tabla 2.5: Capacidades disponibles con ISM6 y con XPIC.

2.1.4. Parámetros de degradación

Los principales factores que afectan a la propagación de la señal en un radioenlace son las pérdidas por espacio libre, difracción y precipitaciones y gases, además de las interferencias y los desvanecimientos.

Pérdidas en espacio libre

Las ondas electromagnéticas, al propagarse por el espacio, sufre pérdidas debidas únicamente a la distancia, sin tener en cuenta los fenómenos de propagación. Por la Rec. UIT-R P.525-2 [9], las pérdidas en espacio libre para enlaces punto a punto se pueden calcular como

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) \quad (2.2)$$

donde:

L_{bf} con las pérdidas básicas de transmisión en el espacio libre (dB)

d es la distancia

λ es la longitud de onda

Pérdidas por difracción

La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre un obstáculo. Éste, puede impedir la visibilidad entre la antena transmisora y receptora, dando lugar a una zona oculta a la antena transmisora llamada zona de difracción, mostrada en la Figura 2.7, en la cual es posible la recepción de la señal, pero con unas atenuaciones superiores a las del espacio libre.



Figura 2.7: Obstrucción causada por la tierra [10].

Esto, se puede explicar mediante el principio de Huygens, que determina que cada punto de un frente de ondas es a su vez una fuente secundaria de ondas esféricas que se expanden en todas direcciones con la misma velocidad y frecuencia que la onda primaria. Sabiendo esto, es fácil comprender que, a pesar de que no exista visión directa entre el emisor y el receptor, se pueda seguir recibiendo señal. Sin embargo, no siempre será posible, ya que se ha de tener en cuenta la forma del obstáculo y la obstrucción que éste genera [11].

En cuanto a la obstrucción, el obstáculo provocará atenuación por difracción a la señal transmitida siempre y cuando se encuentre dentro de la primera elipsoide de Fresnel, cuyo radio se puede calcular como

$$R_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.3)$$

donde:

λ es la longitud de onda

d_1 es la distancia desde el transmisor hasta el obstáculo

d_2 es la distancia desde el obstáculo hasta el receptor

También se ha de tener en cuenta si el obstáculo se puede considerar como:

- Obstáculo en arista en filo de cuchillo, cuyo efecto se puede aproximar con la gráfica de la Figura 2.8, donde se comprueba que cuando la relación h/R_1 sea menor o igual a, aproximadamente, 0.5, las pérdidas por difracción afectarán de forma considerable al enlace.

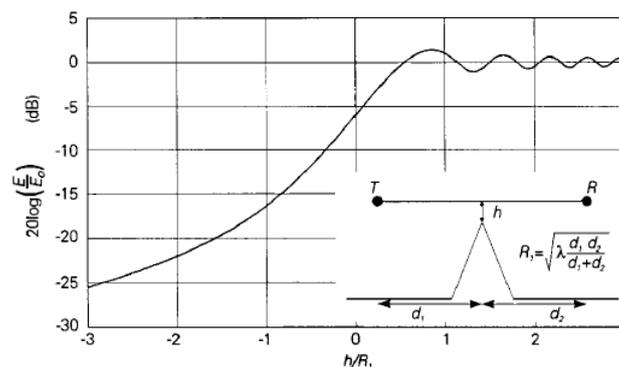


Figura 2.8: Pérdidas de difracción por aristas [10].

- Obstáculo de forma redondeada, en cuyo caso habría que tener en cuenta el radio R , además de las distancias del receptor y transmisor con el obstáculo y la altura por encima de la línea base.

Pérdidas por gases

La atenuación por gases se refiere a la absorción producida por las moléculas de oxígeno y vapor de agua presentes en la atmósfera, que pueden provocar un gran impacto en determinadas frecuencias. Para su cálculo, se debe seguir la ecuación 2.4 y consultar los valores de la atenuación específica debida a los gases mostrados en la Figura 2.9.

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_0 + \gamma_\omega) r_0 \quad (2.4)$$

donde:

A es la atenuación total del trayecto (dB)

γ es la atenuación específica causada por los gases (dB/km)

γ_0 es la atenuación específica debida al aire seco

γ_ω es la atenuación específica debida al agua

r_0 es la longitud del trayecto (km)

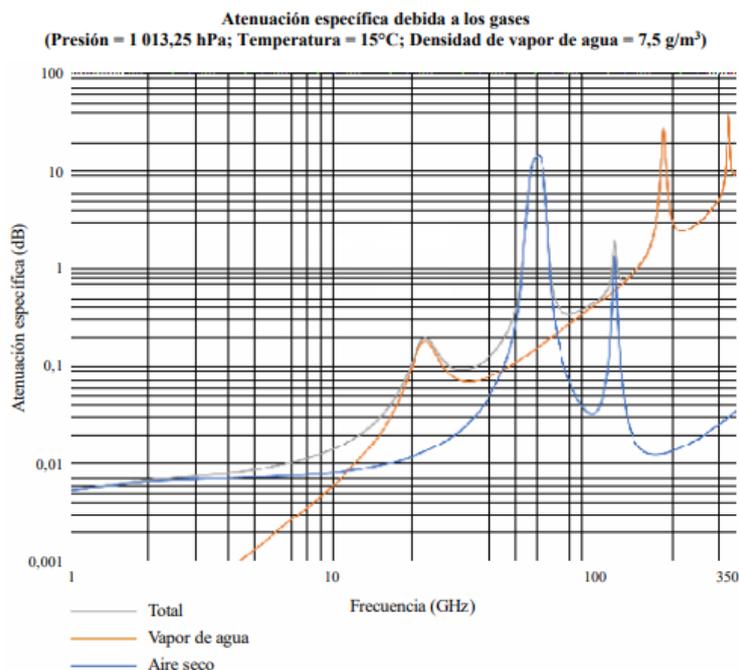


Figura 2.9: Pérdidas de difracción por aristas [12].

Pérdidas por precipitaciones

En cuanto a la atenuación por hidrometeoros, la más importante es la debida a la lluvia, ya que tanto la nieve como la niebla o el granizo producen una atenuación menor en las bandas de diseño de radioenlaces fijos punto a punto.

Para estimar las estadísticas de esta atenuación a largo plazo, se han de seguir los siguientes pasos [13]:

1. Obtener la intensidad de precipitación $R_{0,01}$ superada durante el 0.01 % del tiempo. En caso de no disponer de esta información, se puede consultar en la Recomendación UIT-R P.837 [14].
2. Calcular la atenuación específica γ_R para la frecuencia, polarización e intensidad de precipitación de interés, tal y como se indica en la Recomendación UIT-R P.838 [15]. De los valores de k y α detallados en esta Recomendación, se concluye que para las frecuencias utilizadas en los enlaces de microondas, la polarización vertical es más robusta frente a la lluvia que la polarización horizontal, debido al achatamiento en la forma de las gotas de lluvia que produce el rozamiento.

$$\gamma_R = kR^\alpha \text{ (dB/km)} \quad (2.5)$$

donde:

R es la intensidad de lluvia (mm/h)

k y α son constantes que dependen de la frecuencia, cuyos valores se detallan en la misma recomendación.

3. Calcular la longitud efectiva del trayecto d_{eff} del enlace multiplicando la longitud del trayecto real d por un factor de distancia r , cuya estimación viene dada por la Ecuación 2.6.

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633}R_{0,01}^{0,073\alpha}f^{0,123} - 10,579(1 - e^{-0,024d})} \quad (2.6)$$

donde:

f es la frecuencia (GHz)

α es el exponente en el modelo de atenuación específico del Paso 2

4. Estimar la atenuación del trayecto excedida durante el 0.01 % del tiempo mediante la Ecuación 2.7.

$$A_{0,01} = \gamma_{Rdef} f = \gamma_{Rdr}(dB) \quad (2.7)$$

Interferencias

Las interferencias, según la generación de la señal, pueden ser intrasistema, si son acoplamientos generados por el propio sistema, o intersistema, si son causadas por otros sistemas. Dentro de estas últimas, distinguimos dos tipos:

- Interferencias de canal adyacente: como su nombre indica, son las causadas por equipos que trabajan en canales contiguos al canal de trabajo del equipo interferido; por eso, son fáciles de atenuar mediante el empleo de filtros.
- Interferencias cocanal: son las generadas por equipos que trabajan en el mismo canal que el equipo que interfieren, por lo que son más complejas de solucionar.

Para determinar el efecto de las interferencias a la señal, se calcula la relación portadora/interferencia (C/I) [16]:

$$C/I = P_{r_D} - P_{r_I} = P_{t_D} - P_{t_I} + (G_{t_D} + G_{r_D}) - (G_{t_I} + G_{r_I}) + L_{b_I} - L_{b_D} (dB) \quad (2.8)$$

donde:

P_{r_D} es la potencia del receptor deseado (dBm)

P_{r_I} es la potencia del receptor interferente (dBm)

P_{t_D} es la potencia del transmisor deseado

P_{t_I} es la potencia del transmisor interferente (dBm)

G_{t_D} es la ganancia de la antena transmisora deseada (dB)

G_{r_D} es la ganancia de la antena receptora deseada (dB)

G_{t_I} es la ganancia de la antena transmisora interferente (dB)

G_{r_I} es la ganancia de la antena receptora interferente (dB)

L_{b_I} son las pérdidas básicas de la señal interferente (dB)

L_{b_D} son las pérdidas básicas de la señal deseada (dB)

2.2. Configuraciones posibles de un radioenlace

Al hacer el diseño de un radioenlace, éste se puede configurar con distintos modos de funcionamiento según las necesidades requeridas. A continuación, se muestran las configuraciones básicas que se pueden utilizar ¹ :

¹Para más información sobre los módulos IDU y ODU, ver Anexo B

2.2.1. 1+0

Es la configuración más simple y común de un radioenlace. Se implementa con una sola ODU (OutDoor Unit) acoplada a una parábola de polarización simple y una sola IDU (InDoor Unit).

2.2.2. 1+1

Se utilizan dos ODUs conectadas a un *splitter*, conectado a una sola parábola. De esta forma, se obtiene un enlace con protección, en el cual funcionará la ODU principal o *master*, y en caso de que esta fallase, trabajaría la secundaria o *slave*. También se puede realizar con dos ODUs y dos parábolas.

2.2.3. 2+0 (XPIC)

Se utilizan dos ODUs conectadas al transductor ortomodal (OMT) y todo ello acoplado a una sola parábola de doble polarización. Las dos ODUs se pueden configurar en el mismo canal o junto con el canal adyacente, pero una en polarización horizontal y otra en vertical.

Capítulo 3

Desarrollo práctico

3.1. Introducción

Realizar el *swap* de un radioenlace no es más que cambiar su frecuencia de funcionamiento de una banda a otra. Por ello, en esta situación no será necesario hacer la viabilidad del nuevo enlace entre los emplazamientos, pues ya sabemos que es factible crear uno entre las ubicaciones seleccionadas.

Como sabemos, el radioenlace bajo estudio está diseñado en 26 GHz. De acuerdo a su frecuencia y distancia, se propondrán tres diseños distintos en las bandas adyacentes en las que el cliente posea canales propios. Éstas son las de 38 GHz, 23 GHz y 18 GHz. Como se ha dicho en el Capítulo 2, se empezará diseñando en la banda más alta; es decir, en la de 38 GHz, con el fin de optimizar el uso del espectro. Además, se comprobará si cada uno de los diseños sugeridos cumplen o no con los requisitos demandados por el cliente, y en caso afirmativo, se compararán los tres para escoger el óptimo. Una vez tengamos claro qué diseño se llevará a cabo, se escogerán los equipos que conformarán el radioenlace. Finalmente, se elaborará un presupuesto aproximado del coste del trabajo elegido.

3.2. Diseño actual en 26 GHz

Este radioenlace tiene como origen la localización Site A, y Site B como destino.¹ Las cotas, respectivamente, son de 1467 m y 618 m sobre el nivel del mar. Estos dos emplazamientos están separados por una distancia de 9.44 km.

Tal y como se ha desarrollado en el Anexo A, podemos comprobar que haya línea de visión directa (LOS) entre los dos emplazamientos en la vista del perfil del terreno que ofrece iQ-link, representada en la Figura 3.1.

Como se ha adelantado anteriormente, el vano está ubicado en la banda de 26 GHz. En concreto, usa la frecuencia de 26313 MHz para transmitir en origen y la de 25305 MHz para transmitir en destino, y el ancho de banda del canal utilizado es de 28 MHz. En cuanto a la modulación, tiene configurada la modulación adaptativa, desde QPSK hasta 256 QAM. Tanto el ancho de banda del canal y la modulación máxima configurada, así como las tarjetas radio IFU2 que utiliza, permiten que el radioenlace alcance una capacidad de hasta 183 Mbps.

Otros aspectos imprescindibles del enlace son las antenas y su polarización. Éstas son del fabricante Huawei, específicas para la polarización vertical. Tienen un tamaño de 0.6 m en cada extremo y se encuentran colocadas a una altura sobre el suelo de 20 m en origen y 13 m en destino.

¹Nota: Con el fin de preservar la privacidad del cliente, algunos datos del diseño serán modificados (nombres de las localizaciones, de canales) u omitidos (coordenadas, radioenlaces interferentes).

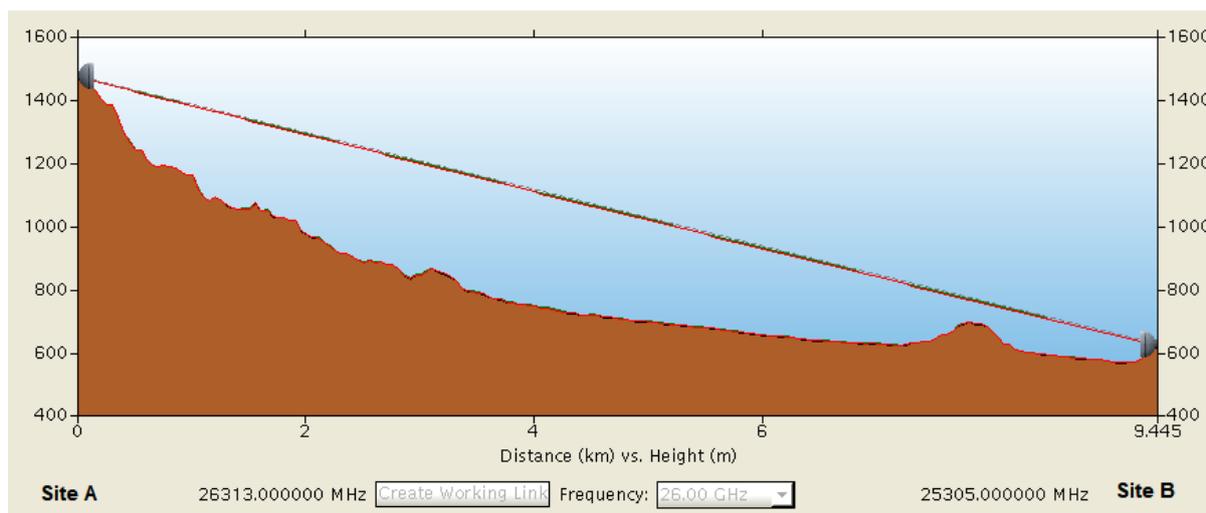


Figura 3.1: Perfil del vano.

Todas estas características del radioenlace se resumen en la Tabla 3.1.

Localización origen	Nombre	Cota		
	Site A	1467 m		
Localización destino	Nombre	Cota		
	Site B	618 m		
Distancia	9.44 km			
Configuración actual	Banda	Ancho de banda	Tarjeta	Modulación máxima
	26 GHz	28 MHz	IFU2	256 QAM
	Antena	Polarización	Diámetro parábola origen	Diámetro parábola destino
	Huawei	Vertical	0.6 m	0.6 m
	Potencia	Banda reservada / Fuera de banda		Capacidad máxima
25 dBm	Banda reservada		183 Mbps	

Tabla 3.1: Características del diseño en 26 GHz.

3.3. Diseño en 38 GHz

3.3.1. Banda de trabajo

Para empezar con el diseño, escogeremos en primer lugar la banda de frecuencia de trabajo, que será de 38 GHz. Por la Tabla 2.1, podemos intuir que no será sencillo diseñar el enlace en estas frecuencias, ya que la distancia de aproximadamente 9.5 km que separa sus extremos es mayor que el máximo de 5 km que se recomienda para hacer uso de esta banda.

3.3.2. Capacidad, ancho de banda, modulación y equipos

Tal y como se ha explicado anteriormente, la capacidad del radioenlace depende de la tarjeta radio que se utilice, así como de la modulación y el ancho de banda del canal.

En cuanto a la tarjeta radio, puesto que no se requiere una capacidad excesivamente alta que necesite un radioenlace XPIC, se utilizará el modelo ISV3, junto con una ODU XMC-2. Partiendo de esto,

y de acuerdo a la Tabla 2.2, para poder alcanzar la capacidad necesitada, tenemos dos opciones de diseño:

- Canal con un ancho de banda de 28 MHz y modulación de 256 QAM o superior.
- Canal con un ancho de banda 56 MHz y modulación de 32 QAM o superior.

De nuevo, como una de nuestras prioridades es hacer un uso eficiente del espectro, se intentará realizar el diseño siguiendo la primera opción, pues así quedan más canales libres en la banda para otros radioenlaces.

En cuanto a la modulación, seleccionaremos primero todas las disponibles para intentar dar más capacidad que la pedida al radioenlace, y se irá ajustando según las necesidades del diseño.

3.3.3. Antenas

Las antenas a utilizar han de ser compatibles con los equipos, por lo que escogeremos las UHPM de Huawei de una sola polarización. En cuanto al tamaño, para intentar optimizar el espacio en la estructura, en principio escogeremos las más pequeñas, de 0.3 m de diámetro.

3.3.4. Potencia y configuración radio

Una vez conocemos todo esto, podemos ajustar la potencia para, en primer lugar, que el diseño cumpla los requisitos exigidos, y además intentar optimizar el nivel de campo transmitido.

Inicialmente, veremos la configuración radio para el nivel de potencia máximo, y, partiendo de eso, comprobar si se puede disminuir y seguir cumpliendo los criterios.

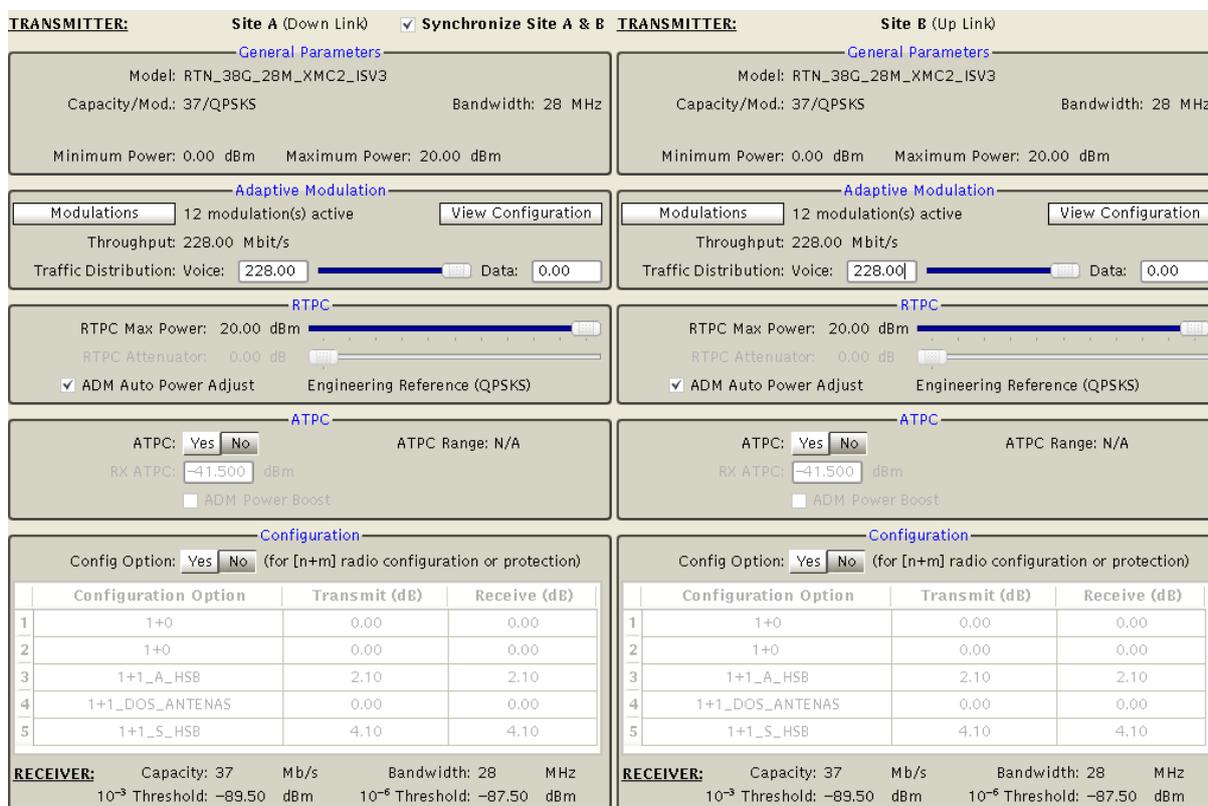


Figura 3.2: Apartado radio del diseño inicial en 38 GHz.

Para asegurar que el radioenlace tendrá un funcionamiento adecuado, tal y como se especifica en el Anexo A, el *Composite Fade Margin* ha de ser mayor de 30 dB para el esquema de modulación

mínimo y mayor de 10 dB para el máximo. Además, el nivel de campo recibido debe estar entre -35 y -45 dBm, con el fin de no trabajar en valores cercanos a la saturación y además poder mantener un valor adecuado de margen frente a desvanecimientos.

Sabiendo esto, se puede ver en la Figura 3.3 que el nivel de *Composite Fade Margin* cumple para la modulación QPSKS, pero el nivel de 1.38 dB que tiene para 256QAM es mucho menor al límite de 10 dB que se requería. Además, el nivel de campo recibido también es menor a -45 dBm, por lo que no es posible seguir analizando esta configuración.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	20.00	N/A	N/A	0.00	0.00	20.00	30.88	0.00	-20.00	-56.62
2	QPSK		20.00	N/A	N/A	0.00	0.00	20.00	20.88	0.00	-20.00	-56.62
3	16QAMS		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	16.38	0.00	-20.00	-58.62
4	16QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	14.88	0.00	-20.00	-58.62
5	32QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	11.88	0.00	-20.00	-58.62
6	64QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	7.88	0.00	-20.00	-59.62
7	128QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	5.38	0.00	-20.00	-59.62
8	256QAM		16.00	N/A	N/A	N/A	0.00	16.00	1.38	0.00	-25.00	-60.62
9	512QAM		15.00	N/A	N/A	N/A	0.00	15.00	-1.62	0.00	-25.00	-61.62
10	512QAML		15.00	N/A	N/A	N/A	0.00	15.00	-3.12	0.00	-25.00	-61.62
11	1024QAM		13.00	N/A	N/A	N/A	0.00	13.00	-8.62	0.00	-25.00	-63.62
12	1024QAML		13.00	N/A	N/A	N/A	0.00	13.00	-10.62	0.00	-25.00	-63.62

Figura 3.3: Configuración radio del diseño inicial en 38 GHz.

3.3.5. Corrección

Para intentar mejorar el diseño, utilizaremos un canal de 56 MHz. Siguiendo el criterio de antes, seleccionamos todas las modulaciones y el máximo de potencia, obteniendo los parámetros mostrados en la Figura 3.4.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	20.00	N/A	N/A	0.00	0.00	20.00	27.88	0.00	-20.00	-56.62
2	QPSK		20.00	N/A	N/A	0.00	0.00	20.00	18.38	0.00	-20.00	-56.62
3	16QAMS		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	13.88	0.00	-20.00	-58.62
4	16QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	12.38	0.00	-20.00	-58.62
5	32QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	9.38	0.00	-20.00	-58.62
6	64QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	4.88	0.00	-20.00	-59.62
7	128QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	2.38	0.00	-20.00	-59.62
8	256QAM		16.00	N/A	N/A	N/A	0.00	16.00	-1.62	0.00	-25.00	-60.62
9	512QAM		15.00	N/A	N/A	N/A	0.00	15.00	-5.62	0.00	-25.00	-61.62
10	512QAML		15.00	N/A	N/A	N/A	0.00	15.00	-7.12	0.00	-25.00	-61.62
11	1024QAM		13.00	N/A	N/A	N/A	0.00	13.00	-12.12	0.00	-25.00	-63.62
12	1024QAML		13.00	N/A	N/A	N/A	0.00	13.00	-15.12	0.00	-25.00	-63.62

Figura 3.4: Configuración radio tras aumentar el ancho de banda a 56 MHz.

En este caso, para 32QAM tenemos un *CFM* de 9.38 dB, bastante cercano al límite. Por eso, intentaremos mejorar ese valor aumentando el tamaño de las antenas a 0.6 m, tal y como se muestra en la Figura 3.5.

Size (m)	Gain (dBi)	Model	Manufacturer	Status
0.30	40.10	UHPM_SP_03_38	HUAWEI	Active
0.60	45.20	UHPM_SP_06_38	HUAWEI	Active

Figura 3.5: Selección de la nueva antena de 0.6 m.

Ahora, comprobamos en la Figura 3.6 que manteniendo la potencia máxima de 20 dBm sí conseguimos cumplir tanto con el *CFM* como con el campo recibido para 32QAM. Sin embargo, se observa que para 1024QAM y 1024QAML no se cumple el *CFM*, por lo que habrá que deseleccionar estas modulaciones. En esta misma figura, se observa que la Potencia Máxima Transmitida (*Max Tx Power*) se puede disminuir hasta 18 dBm sin afectar a la disponibilidad ante lluvia con la modulación deseada; es decir, 32QAM. Por lo tanto, con el fin de optimizar el diseño, disminuirémos el nivel de potencia hasta este valor.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	20.00	N/A	N/A	0.00	0.00	20.00	49.28	0.00	-20.00	-35.22
2	QPSK		20.00	N/A	N/A	0.00	0.00	20.00	39.78	0.00	-20.00	-35.22
3	16QAMS		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	35.28	0.00	-20.00	-37.22
4	16QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	33.78	0.00	-20.00	-37.22
5	32QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	30.78	0.00	-20.00	-37.22
6	64QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	26.28	0.00	-20.00	-38.22
7	128QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	23.78	0.00	-20.00	-38.22
8	256QAM		16.00	N/A	N/A	N/A	0.00	16.00	19.78	0.00	-25.00	-39.22
9	512QAM		15.00	N/A	N/A	N/A	0.00	15.00	15.78	0.00	-25.00	-40.22
10	512QAML		15.00	N/A	N/A	N/A	0.00	15.00	14.28	0.00	-25.00	-40.22
11	1024QAM		13.00	N/A	N/A	N/A	0.00	13.00	9.28	0.00	-25.00	-42.22
12	1024QAML		13.00	N/A	N/A	N/A	0.00	13.00	6.28	0.00	-25.00	-42.22

Figura 3.6: Configuración radio tras aumentar el tamaño de antena a 0.6 m.

Con 18 dBm se siguen cumpliendo el resto de requisitos, obteniendo los valores mostrados en la Figura 3.7.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	20.00	N/A	N/A	N/A	7.00	18.00	42.28	0.00	-20.00	-42.22
2	QPSK		20.00	N/A	N/A	N/A	7.00	18.00	32.78	0.00	-20.00	-42.22
3	16QAMS		18.00	N/A	N/A	N/A	5.00	18.00	30.28	0.00	-20.00	-42.22
4	16QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	5.00	18.00	28.78	0.00	-20.00	-42.22
5	32QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	5.00	18.00	25.78	0.00	-20.00	-42.22
6	64QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	4.00	18.00	22.28	0.00	-20.00	-42.22
7	128QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	4.00	18.00	19.78	0.00	-20.00	-42.22
8	256QAM		16.00	N/A	N/A	N/A	3.00	18.00	16.78	0.00	-25.00	-42.22
9	512QAM		15.00	N/A	N/A	N/A	2.00	18.00	13.78	0.00	-25.00	-42.22
10	512QAML		15.00	N/A	N/A	N/A	2.00	18.00	12.28	0.00	-25.00	-42.22

Figura 3.7: Configuración radio al disminuir la potencia a 18 dBm.

3.3.6. Disponibilidad ante lluvia

Una vez hemos ajustado la potencia, comprobamos la disponibilidad ante lluvia en la Figura 3.8. Tal y como habíamos visto, no sólo se cumple para 32QAM, sino que podríamos incluso alcanzar hasta 64QAM, teniendo en cuenta que es un valor muy al límite y en algunos momentos el radioenlace no funcionaría a nivel óptimo.

Modulation	EIRP (dBm)	Rain	Hardware	Total	ITU Objective
QPSKS	65.20/65.20	0.011503	0.005181	0.016684	0.300000
QPSK	65.20/65.20	0.020026	0.005181	0.025207	0.300000
16QAMS	63.20/63.20	0.026741	0.005181	0.031922	0.300000
16QAM	63.20/63.20	0.029593	0.005181	0.034774	0.300000
32QAM	63.20/63.20	0.036563	0.005181	0.041744	0.300000
64QAM	62.20/62.20	0.051564	0.005181	0.056745	0.300000

Figura 3.8: Disponibilidad ante lluvia tras aumentar a 20 dBm.

3.3.7. Interferencias

Para terminar el diseño, hay que comprobar que no haya enlaces interferentes ni que nuestro diseño interfiera a los que ya están en red. Tras hacer el análisis, observamos en la Figura 3.9 que en el Canal CH1 se cumple esto, ya que el número de casos es 0 y el análisis acumulado de interferencias (*Cummulative*) tanto en origen como en destino es menor de -100 dBm.

Channel Number	Number of Cases	Number of Paths	Cumulative into Site A (dBm)
1 CH1	0	0	-133.44

Channel Number	Number of Cases	Number of Paths	Cumulative into Site B (dBm)
1 CH1	0	0	-148.09

Figura 3.9: Cálculo de interferencias en banda 38 GHz.

3.4. Diseño en 23 GHz

3.4.1. Banda de trabajo

En este caso, seleccionaremos la banda de 23 GHz, que, tal y como comprobamos en la Tabla 2.1, no supondrá ningún problema por la distancia del enlace.

3.4.2. Capacidad, ancho de banda, modulación y equipos

Al igual que con el diseño en 38 GHz, podremos utilizar un canal de 28 MHz junto con una modulación 256QAM o un ancho de banda de 56 MHz y una modulación 32QAM para alcanzar los 183 Mbps de capacidad deseada. Siguiendo el razonamiento argumentado en el diseño anterior, lo intentaremos primero con el canal de 28 MHz. De acuerdo a esto, escogeremos los equipos radio de estas características.

3.4.3. Antenas

De nuevo, intentaremos realizar el diseño con las antenas más pequeñas disponibles, las UHPM SP de 0.3 m.

3.4.4. Potencia y configuración radio

Configurando la potencia a 24 dBm, máximo nivel que permiten los equipos escogidos, se comprueba en la Figura 3.11 que tanto el nivel recibido de señal como el *Composite Fade Margin* son demasiado bajos, por lo que será necesario aumentar el tamaño de las antenas.

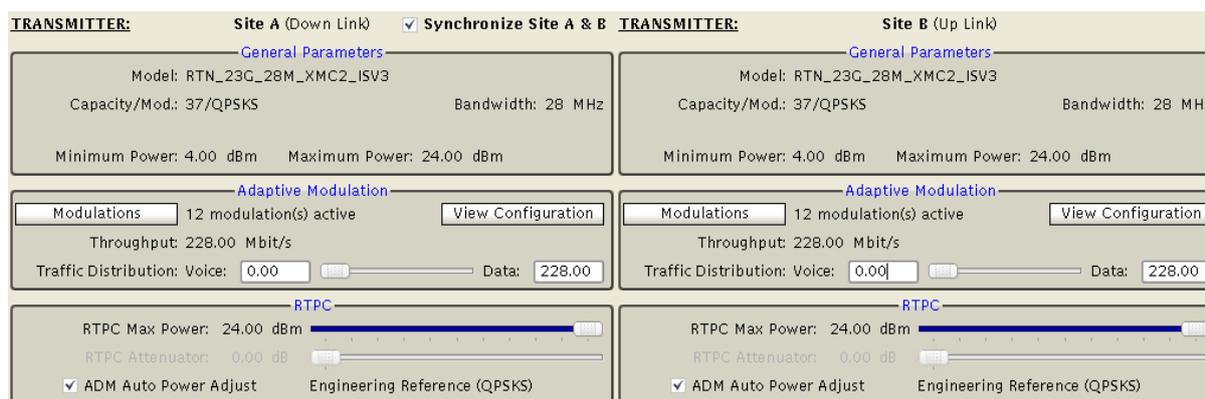


Figura 3.10: Apartado radio del diseño inicial en 23 GHz.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	24.00	N/A	N/A	0.00	0.00	24.00	43.14	4.00	-20.00	-46.36
2	QPSK		24.00	N/A	N/A	0.00	0.00	24.00	33.14	4.00	-20.00	-46.36
3	16QAMS		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	29.64	4.00	-20.00	-47.36
4	16QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	28.14	4.00	-20.00	-47.36
5	32QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	25.14	4.00	-20.00	-47.36
6	64QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	0.00	22.00	21.14	4.00	-20.00	-48.36
7	128QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	0.00	22.00	18.64	4.00	-20.00	-48.36
8	256QAM		19.50	N/A	N/A	N/A	0.00	19.50	13.14	4.00	-25.00	-50.86
9	512QAM		19.50	N/A	N/A	N/A	0.00	19.50	11.14	4.00	-25.00	-50.86
10	512QAML		19.50	N/A	N/A	N/A	0.00	19.50	9.64	4.00	-25.00	-50.86
11	1024QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	4.64	4.00	-25.00	-52.36
12	1024QAML		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	2.64	4.00	-25.00	-52.36

Figura 3.11: Configuración radio del diseño inicial en 23 GHz.

3.4.5. Corrección

Ahora, utilizando unas parábolas de 0.6 m de diámetro y el máximo nivel de potencia como se muestra en la Figura 3.12, se cumplen sin ningún problema los requisitos de nivel de señal y *CFM* para todas las modulaciones seleccionadas.

Por lo tanto, podremos disminuir la potencia hasta 19 dBm, el mínimo para no afectar a la disponibilidad ante lluvia. Como se ha comprobado que se siguen cumpliendo los requisitos, se atenuará la potencia hasta 18 dBm. De esta forma, se observa en la Figura 3.13 que los parámetros de potencia y desvanecimiento siguen cumpliendo los objetivos.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	24.00	N/A	N/A	0.00	0.00	24.00	52.94	4.00	-20.00	-36.56
2	QPSK		24.00	N/A	N/A	0.00	0.00	24.00	42.94	4.00	-20.00	-36.56
3	16QAMS		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	39.44	4.00	-20.00	-37.56
4	16QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	37.94	4.00	-20.00	-37.56
5	32QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	34.94	4.00	-20.00	-37.56
6	64QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	0.00	22.00	30.94	4.00	-20.00	-38.56
7	128QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	0.00	22.00	28.44	4.00	-20.00	-38.56
8	256QAM		19.50	N/A	N/A	N/A	0.00	19.50	22.94	4.00	-25.00	-41.06
9	512QAM		19.50	N/A	N/A	N/A	0.00	19.50	20.94	4.00	-25.00	-41.06
10	512QAML		19.50	N/A	N/A	N/A	0.00	19.50	19.44	4.00	-25.00	-41.06
11	1024QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	14.44	4.00	-25.00	-42.56
12	1024QAML		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	12.44	4.00	-25.00	-42.56

Figura 3.12: Configuración radio tras aumentar el tamaño de antena a 0.6 m.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	24.00	N/A	N/A	N/A	6.00	18.00	46.94	4.00	-20.00	-42.56
2	QPSK		24.00	N/A	N/A	N/A	6.00	18.00	36.94	4.00	-20.00	-42.56
3	16QAMS		23.00	N/A	N/A	N/A	5.00	18.00	34.44	4.00	-20.00	-42.56
4	16QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	5.00	18.00	32.94	4.00	-20.00	-42.56
5	32QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	5.00	18.00	29.94	4.00	-20.00	-42.56
6	64QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	4.00	18.00	26.94	4.00	-20.00	-42.56
7	128QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	4.00	18.00	24.44	4.00	-20.00	-42.56
8	256QAM		19.50	N/A	N/A	N/A	1.50	18.00	21.44	4.00	-25.00	-42.56
9	512QAM		19.50	N/A	N/A	N/A	1.50	18.00	19.44	4.00	-25.00	-42.56
10	512QAML		19.50	N/A	N/A	N/A	1.50	18.00	17.94	4.00	-25.00	-42.56
11	1024QAM		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	14.44	4.00	-25.00	-42.56
12	1024QAML		18.00	N/A	N/A	N/A	0.00	18.00	12.44	4.00	-25.00	-42.56

Figura 3.13: Configuración radio tras disminuir la potencia a 18 dBm.

3.4.6. Disponibilidad ante lluvia

Vemos ahora en la Figura 3.14 que la disponibilidad ante lluvia es buena hasta 512QAML, por lo que deseleccionaremos las modulación superior y podremos obtener una capacidad de hasta 210 Mbps.

Modulation	EIRP (dBm)	unavailability			ITU Objective
		Rain	Hardware	Total	
QPSKS	58.70/58.70	0.002209	0.005181	0.007390	0.300000
QPSK	58.70/58.70	0.004904	0.005181	0.010085	0.300000
16QAMS	58.70/58.70	0.006060	0.005181	0.011241	0.300000
16QAM	58.70/58.70	0.006903	0.005181	0.012084	0.300000
32QAM	58.70/58.70	0.009039	0.005181	0.014220	0.300000
64QAM	58.70/58.70	0.012006	0.005181	0.017187	0.300000
128QAM	58.70/58.70	0.015421	0.005181	0.020602	0.300000
256QAM	58.70/58.70	0.021258	0.005181	0.026439	0.300000
512QAM	58.70/58.70	0.026742	0.005181	0.031923	0.300000
1024QAM	58.70/58.70	0.051194	0.005181	0.056375	0.300000

Figura 3.14: Disponibilidad ante lluvia con potencia de 18 dBm.

3.4.7. Interferencias

Finalmente, hacemos el análisis de interferencias, obteniendo que el único canal disponible del cliente, CH5, tiene 3 posibles casos interferentes en polarización horizontal, como se muestra en la Figura 3.15

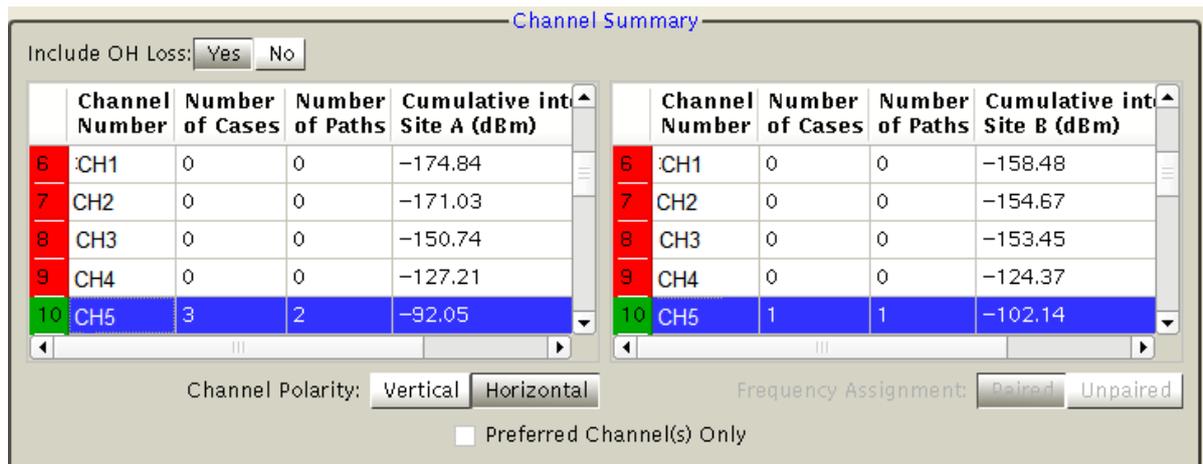


Figura 3.15: Cálculo de casos interferentes en banda 23 GHz y polarización horizontal.

Al analizar con más detalle, vemos en la Figura 3.16 que, a pesar de que en el destino la degradación es de apenas 1 dB, en el Site A es mayor de 3 dB, concretamente de 5.73 dB. Por lo tanto, el nivel de potencia transmitida y recibida en el origen de nuestro vano no será el adecuado. Así, se ha de descartar el uso de este canal.

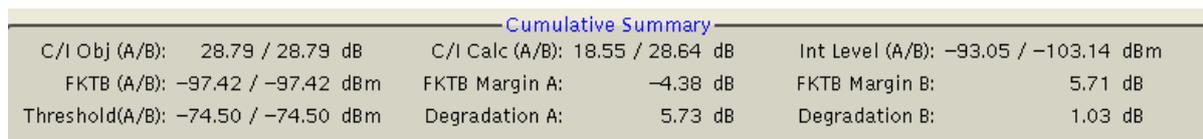


Figura 3.16: Análisis de la degradación en el canal CH5 con polarización horizontal.

A pesar de no tener la posibilidad de utilizar el canal CH5 con polarización horizontal, se analizará uno de los casos interferentes para comprender cómo afectaría exactamente el radioenlace a nuestro diseño. En la Figura 3.17 se observa que nuestro origen, nombrado como A, interfiere con el destino, denominado D, de otro radioenlace ya activo en la red, provocando una pérdida de potencia en ese extremo de 4.87 dB, la cual está por encima de los 3 dB que son asumibles. Además, ese destino D interfiere en el origen A del vano que estamos diseñando, disminuyendo 10 dB el nivel de potencia recibida. Por ello, asignar el canal CH5 como canal de trabajo, no sólo provocará que el radioenlace diseñado no funcione de forma correcta, sino que afectará también a otro enlace que actualmente ya está integrado en la red.

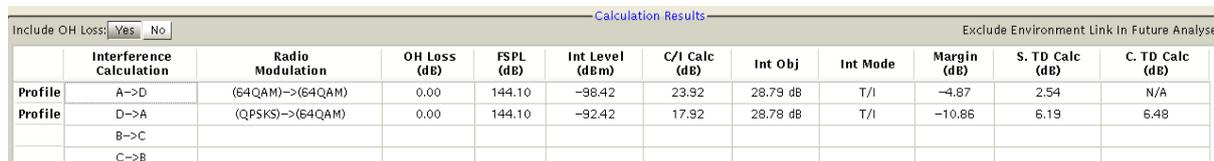


Figura 3.17: Análisis de interferencias en el canal CH5 con polarización horizontal.

Como no se disponen de más canales en banda 23 GHz, será necesario analizar el mismo canal CH5, pero seleccionando ahora la polarización vertical.

En la Figura 3.18 comprobamos que, tras realizar el análisis vertical, existe un sólo posible caso interferente en el canal del cliente. Aunque tiene un valor de interferencia acumulada muy cercano al límite (recordemos que para un funcionamiento óptimo el parámetro *Cumulative interference* debe ser menor a -100 dBm), lo estudiaremos más detenidamente, ya que, en caso de tampoco poder usar esta polarización, sería necesario realizar un alquiler de canal, pudiendo ser un problema a la hora de

presentar el diseño al cliente.

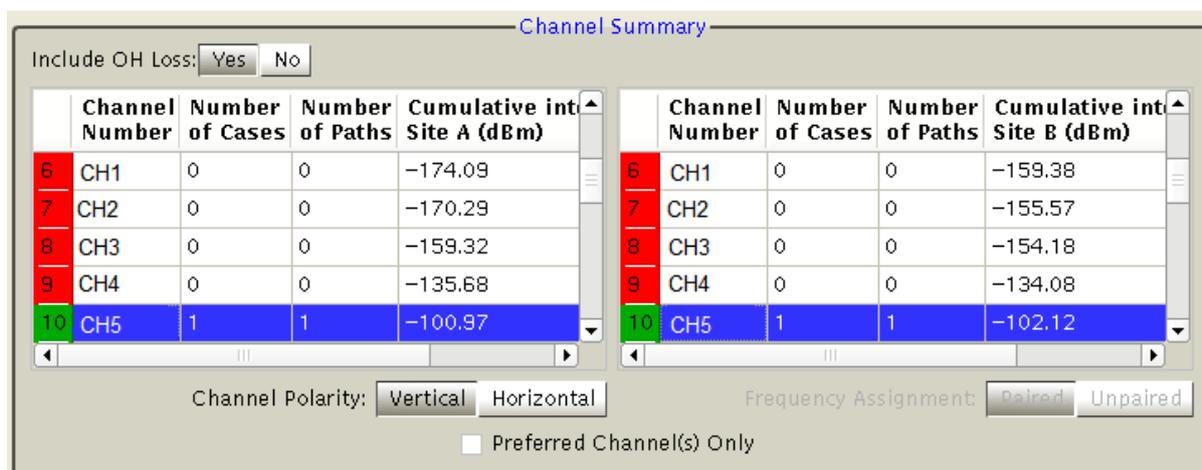


Figura 3.18: Cálculo de casos interferentes en banda 23 GHz y polarización vertical.

En cuanto a la degradación, en la Figura 3.19 se observa que es menor a 3 dB, tanto en origen como en destino, por lo que es correcta.

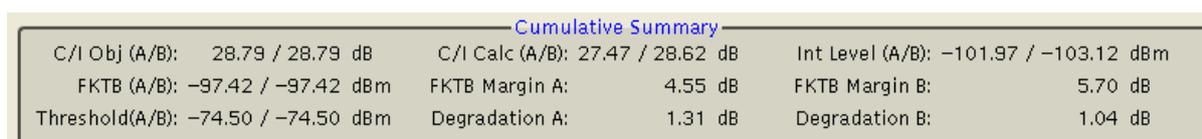


Figura 3.19: Análisis de la degradación en el canal CH5 con polarización vertical.

En este caso, comprobamos en la Figura 3.20 que es el otro enlace el que interfiere al nuestro en ambos emplazamientos, pero al tener un margen superior a -3 dB es una interferencia asumible.

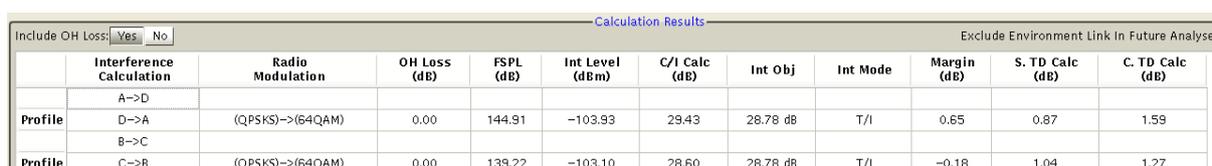


Figura 3.20: Análisis de interferencias en el canal CH5 con polarización vertical.

Por lo tanto, podremos seleccionar este canal en polarización vertical, evitando así la necesidad de alquilar un canal fuera de banda.

3.5. Diseño en 18 GHz

3.5.1. Banda de trabajo

Para este diseño, escogeremos la banda de 18 GHz. Viendo la Tabla 2.1, podemos adelantar que no será un problema plantear este radioenlace, ya que se suele utilizar para vanos de mayor longitud.

3.5.2. Capacidad, ancho de banda, modulación y equipos

De nuevo, intentaremos realizar el diseño con 28 MHz de ancho de banda y 256QAM de modulación. En cuanto a los equipos, seguimos usando ISV3 y ODU XMC-2.

3.5.3. Antenas

Al igual que los diseños anteriores, empezaremos con las antenas de 0.3 m, tanto en origen como en destino.

3.5.4. Potencia y configuración radio

Ajustando la potencia hasta el máximo de 24 dBm, se observa que el nivel de *Composite Fade Margin* está dentro del rango adecuado hasta 512QAM. A pesar de esto, el campo recibido es demasiado bajo en todas las modulaciones, por lo que será necesario aumentar el tamaño de las antenas para poder recibir un nivel de señal correcto.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	24.00	N/A	N/A	0.00	0.00	24.00	43.30	4.00	-20.00	-46.20
2	QPSK		24.00	N/A	N/A	0.00	0.00	24.00	33.80	4.00	-20.00	-46.20
3	16QAMS		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	30.30	4.00	-20.00	-47.20
4	16QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	28.80	4.00	-20.00	-47.20
5	32QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	25.80	4.00	-20.00	-47.20
6	64QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	0.00	22.00	21.80	4.00	-20.00	-48.20
7	128QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	0.00	22.00	19.30	4.00	-20.00	-48.20
8	256QAM		20.00	N/A	N/A	N/A	0.00	20.00	14.30	4.00	-25.00	-50.20
9	512QAM		19.00	N/A	N/A	N/A	0.00	19.00	11.30	4.00	-25.00	-51.20
10	512QAML		19.00	N/A	N/A	N/A	0.00	19.00	9.80	4.00	-25.00	-51.20
11	1024QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	4.30	4.00	-25.00	-53.20
12	1024QAML		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	2.30	4.00	-25.00	-53.20

Figura 3.21: Configuración radio del diseño inicial en 18 GHz.

3.5.5. Corrección

Con unas antenas de 0.6 m de diámetro, se comprueba en la Figura 3.22 que podremos utilizar todas las modulaciones cumpliendo tanto con el *CFM* como con la potencia recibida.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	24.00	N/A	N/A	0.00	0.00	24.00	54.50	4.00	-20.00	-35.00
2	QPSK		24.00	N/A	N/A	0.00	0.00	24.00	45.00	4.00	-20.00	-35.00
3	16QAMS		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	41.50	4.00	-20.00	-36.00
4	16QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	40.00	4.00	-20.00	-36.00
5	32QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	0.00	23.00	37.00	4.00	-20.00	-36.00
6	64QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	0.00	22.00	33.00	4.00	-20.00	-37.00
7	128QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	0.00	22.00	30.50	4.00	-20.00	-37.00
8	256QAM		20.00	N/A	N/A	N/A	0.00	20.00	25.50	4.00	-25.00	-39.00
9	512QAM		19.00	N/A	N/A	N/A	0.00	19.00	22.50	4.00	-25.00	-40.00
10	512QAML		19.00	N/A	N/A	N/A	0.00	19.00	21.00	4.00	-25.00	-40.00
11	1024QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	15.50	4.00	-25.00	-42.00
12	1024QAML		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	13.50	4.00	-25.00	-42.00

Figura 3.22: Configuración radio tras aumentar el tamaño de antena a 0.6 m.

Sin embargo, el nivel de campo recibido en las modulaciones más bajas es muy cercano al límite superior de -35 dBm. Por ello, disminuirémos la potencia a 17 dBm para evitar una posible saturación en los equipos. De esta manera, se obtiene un nivel mucho más adecuado, a la vez que reduciremos la posibilidad de causar interferencias a otros radioenlaces cercanos que trabajen en esta misma banda. Los valores alcanzados se muestran en la Figura 3.23.

	Modulation	Engineering Reference	Max Tx Power dBm	ATPC Tx @ Upper Rx Trigger dBm	ATPC Tx @ Lower Rx Trigger dBm	RTPC Attenuator dB	RTPC Power Limiter dB	Configured Power dBm	Composite Fade Margin dB	Min Tx Power dBm	Distortion RSL dBm	Max Rx Level dBm
1	QPSKS	X	24.00	N/A	N/A	N/A	7.00	17.00	47.50	4.00	-20.00	-42.00
2	QPSK		24.00	N/A	N/A	N/A	7.00	17.00	38.00	4.00	-20.00	-42.00
3	16QAMS		23.00	N/A	N/A	N/A	6.00	17.00	35.50	4.00	-20.00	-42.00
4	16QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	6.00	17.00	34.00	4.00	-20.00	-42.00
5	32QAM		23.00	N/A	N/A	N/A	6.00	17.00	31.00	4.00	-20.00	-42.00
6	64QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	5.00	17.00	28.00	4.00	-20.00	-42.00
7	128QAM		22.00	N/A	N/A	N/A	5.00	17.00	25.50	4.00	-20.00	-42.00
8	256QAM		20.00	N/A	N/A	N/A	3.00	17.00	22.50	4.00	-25.00	-42.00
9	512QAM		19.00	N/A	N/A	N/A	2.00	17.00	20.50	4.00	-25.00	-42.00
10	512QAML		19.00	N/A	N/A	N/A	2.00	17.00	19.00	4.00	-25.00	-42.00
11	1024QAM		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	15.50	4.00	-25.00	-42.00
12	1024QAML		17.00	N/A	N/A	N/A	0.00	17.00	13.50	4.00	-25.00	-42.00

Figura 3.23: Configuración radio tras disminuir la potencia a 17 dBm.

3.5.6. Disponibilidad ante lluvia

En cuanto a la disponibilidad ante lluvia, como suponíamos al utilizar esta banda de frecuencia para un enlace de sólo 9 km, se cumplen los criterios sin ningún problema para todas las modulaciones seleccionadas.

Modulation	EIRP (dBm)	Unavailability			ITU Objective
		Rain	Hardware	Total	
QPSKS	56.80/56.80	0.000506	0.005181	0.005687	0.300000
QPSK	56.80/56.80	0.001340	0.005181	0.006521	0.300000
16QAMS	56.80/56.80	0.001733	0.005181	0.006914	0.300000
16QAM	56.80/56.80	0.002027	0.005181	0.007208	0.300000
32QAM	56.80/56.80	0.002786	0.005181	0.007968	0.300000
64QAM	56.80/56.80	0.003873	0.005181	0.009054	0.300000
128QAM	56.80/56.80	0.005152	0.005181	0.010334	0.300000
256QAM	56.80/56.80	0.007388	0.005181	0.012569	0.300000
512QAM	56.80/56.80	0.009525	0.005181	0.014707	0.300000
512QAML	56.80/56.80	0.011629	0.005181	0.016810	0.300000
1024QAM	56.80/56.80	0.019250	0.005181	0.024431	0.300000
1024QAML	56.80/56.80	0.026500	0.005181	0.031681	0.300000

Figura 3.24: Disponibilidad ante lluvia con potencia de 17 dBm.

3.5.7. Interferencias

Comprobamos ahora si hay enlaces trabajando en la misma banda que puedan afectar al correcto funcionamiento de nuestro vano. De los dos canales de 28 MHz disponibles en esta banda, se comprueba en la Figura 3.25 tras hacer el análisis que el canal CH3 no cumple con el requisito de interferencias acumuladas, mientras que el canal CH4 sí lo hace. Por eso, estudiaremos este caso.

En la Figura 3.26 se observa que la degradación, tanto en el site origen como en el destino es menor de 3 dB. Por lo tanto, tal y como se había adelantado anteriormente, se cumplen los criterios.

Finalmente, el otro radioenlace que interfiere en este canal no degrada la señal, sino que la mejora de forma considerable, ya que el margen es positivo, tal y como se observa en la Figura 3.27.

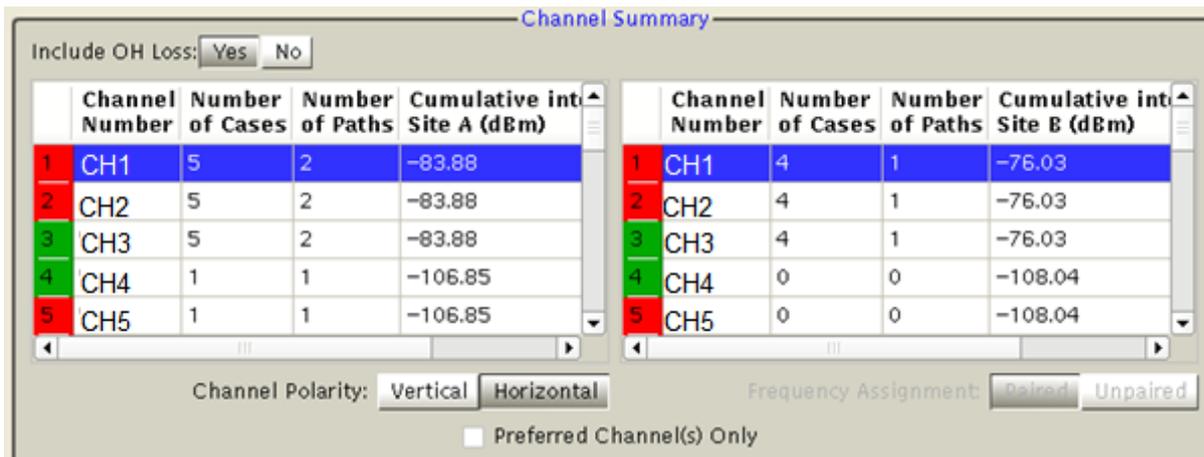


Figura 3.25: Cálculo de interferencias en banda 18 GHz.

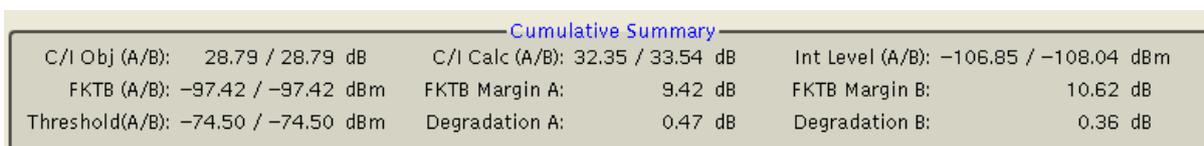


Figura 3.26: Análisis de la degradación en el canal CH4 con polarización horizontal.

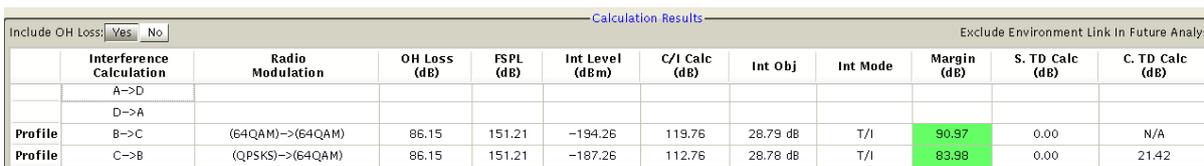


Figura 3.27: Análisis de interferencias en el canal CH4 con polarización horizontal.

En definitiva, utilizar el canal CH4 en este diseño es una buena elección, ya que no sólo no existe ningún radioenlace que pueda degradar la señal, sino que puede llegar a favorecerla.

3.6. Elección del diseño

Para hacer más fácil la elección final del diseño, se comparan las principales características de cada uno en la Tabla 3.2.

Banda de diseño	38 GHz	23 GHz	18 GHz
Ancho de banda	56 MHz	28 MHz	28 MHz
Potencia	11 dBm	18 dBm	17 dBm
Capacidad máxima	422 Mbps	228 Mbps	228 Mbps
Modulación máxima	512 QAML	1024 QAML	1024 QAML
Polarización	Horizontal	Vertical	Horizontal
Tamaño antena	0.6 – 0.6 m	0.6 – 0.6 m	0.6 – 0.6 m

Tabla 3.2: Comparativa de los diseños en 38 GHz, 23 GHz y 18 GHz.

Como vemos, sobre el diseño en 38 GHz se puede destacar a su favor que utiliza la banda más alta que permite que sea viable, dejando disponibles bandas más bajas para radioenlaces de mayor longitud.

Además, conseguimos una capacidad de 422 Mbps, muy superior a los 183 Mbps del diseño inicial. Sin embargo, como se comprueba en la Figura 2.2, al utilizar un ancho de banda de 56 MHz, ocupa el único canal disponible en esta banda, lo que obligaría a diseñar radioenlaces de menor distancia en frecuencias más bajas, derivando esto en un uso inadecuado del espectro. Por todo ello, es un posible diseño, aunque no es el óptimo.

En cuanto al diseño en 23 GHz, aunque es una banda más baja que la de 38 GHz, es adecuada para la distancia del vano. Se puede comprobar que es el diseño con un nivel mayor de potencia, lo cual afecta en dos sentidos. En primer lugar, será el que suponga un mayor gasto eléctrico. Por otra parte, es el que pueda causar mayores interferencias a otros radioenlaces cercanos de la red. Sin embargo, en el cálculo de interferencias hemos visto que, escogiendo la polaridad vertical, no debería provocar ningún tipo de obstáculo en los enlaces cercanos. Además, teniendo en cuenta que los equipos usados en este diseño pueden alcanzar hasta un máximo de 24 dBm, podemos concluir que 18 dBm no es un nivel excesivamente alto. Como ventaja también se puede destacar que, tal y como se observaba en el apartado 2.1.2. Bandas de frecuencia y canalizaciones, la banda de 23 GHz sólo dispone de un canal de 28 MHz, por lo que se preferirá usarla para radioenlaces que no requieran mucha capacidad, como es el diseñado, y dejar disponible los dos canales de 28 MHz de la banda de 18 GHz para poder hacer un canal de 56 MHz y utilizarlo en radioenlaces que necesiten mayores capacidades.

Como desventaja, en el caso de que fuese necesario diseñar otro radioenlace con una disponibilidad ante lluvia baja, no sería posible hacerlo en esta banda de trabajo sin incluir un alquiler de espectro, ya que hemos utilizado la polarización vertical.

Finalmente, el diseño en 18 GHz, al igual que el diseño en 23 GHz, alcanza una capacidad máxima de 228 Mbps, aunque es menor que la proporcionada en el diseño de 38 GHz. No obstante, superamos la capacidad inicial, por lo que no sería ningún inconveniente.

En cambio, a pesar de usar un ancho de banda de 28 MHz, el cual permite que queden libres más canales en la banda, supone un uso ineficiente del espectro. Además de por lo mencionado anteriormente, también se debe a que se está utilizando una banda que permite distancias de hasta 20 km para un radioenlace con una separación entre sus extremos de menos de 10 km, imposibilitando en un futuro que otros enlaces más largos y de mayores capacidades puedan utilizar el canal ocupado.

En conclusión, el diseño que hace un uso más eficaz del espectro es el diseño en 23 GHz. Si a esto, además, añadimos que no sólo se cumplen las características del vano diseñado en 26 GHz, sino que incluso las mejora, como ocurre con la capacidad, hacen de esta banda la mejor opción para diseñar el vano.

3.7. Elección de equipos

Antes de decidir qué equipos utilizaremos, conviene ver el estado actual de la red en la que se encuentra el radioenlace. Para ello, consultaremos el gestor de Huawei. En la Figura 3.28, observamos que nuestro radioenlace de trabajo, llamado radioenlace RE, se encuentra entre un RTN980 en origen y un RTN910 en destino.

Como se ha explicado en el Anexo B, el RTN910 es un equipo actualmente descatalogado, que, en este caso, incluye una tarjeta IFU2, fuera de mercado también. Se ha comprobado realizando los tres diseños que haciendo uso de la tarjeta ISV3 es posible cumplir con todos los requisitos exigidos.

Sabemos también que el equipo equivalente al RTN910 disponible en mercado es el RTN905 2E, el cual incluye esta tarjeta en el slot 3. Por lo tanto, los equipos que se utilizarán en este trabajo serán el RTN 980 existente en el Site A, con una nueva tarjeta ISV3 y un nuevo RTN905 2E en el Site B.

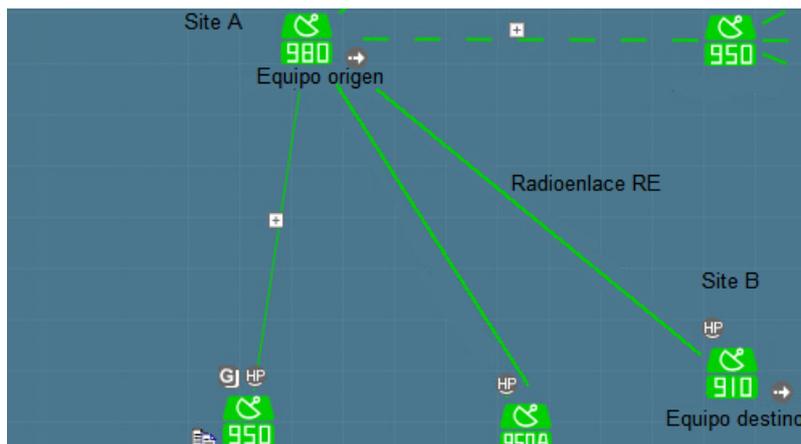


Figura 3.28: Estado actual en red del radioenlace RE diseñado visto en el gestor.

Una vez conocemos esto, se debe determinar qué slots se ocuparán. Para ello, tras consultar en gestor el equipo origen, se comprueba que está libre el slot 9, por lo que será éste el lugar que ocupe la nueva ISV3.

De esta forma, el equipo origen quedaría como muestra la Figura 3.29, mientras que el destino se puede ver en la Figura 3.30.

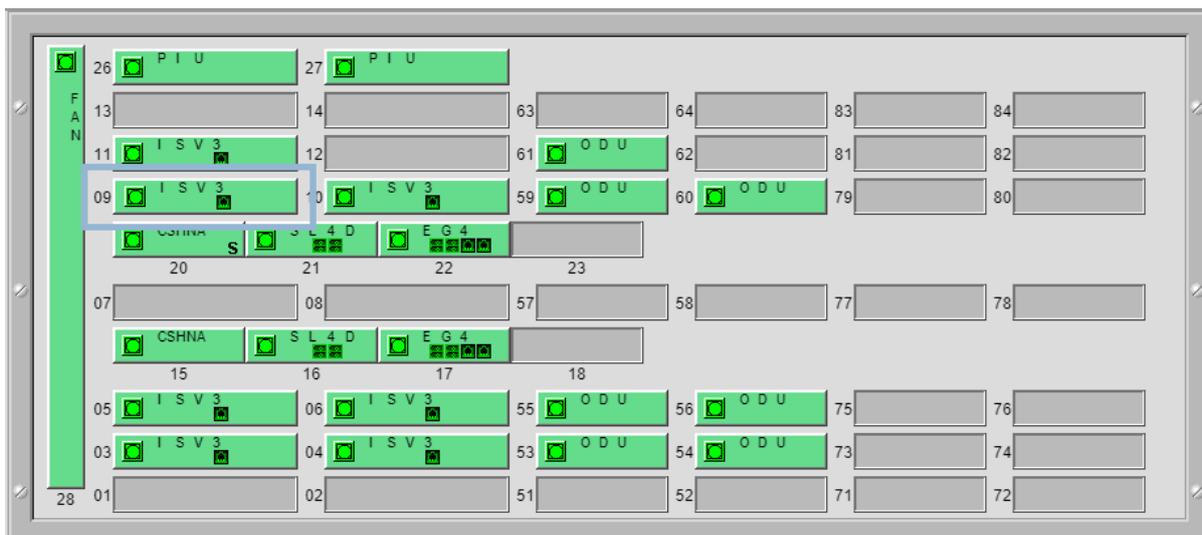


Figura 3.29: Vista en gestor del equipo origen (RTN 980) del Site A.

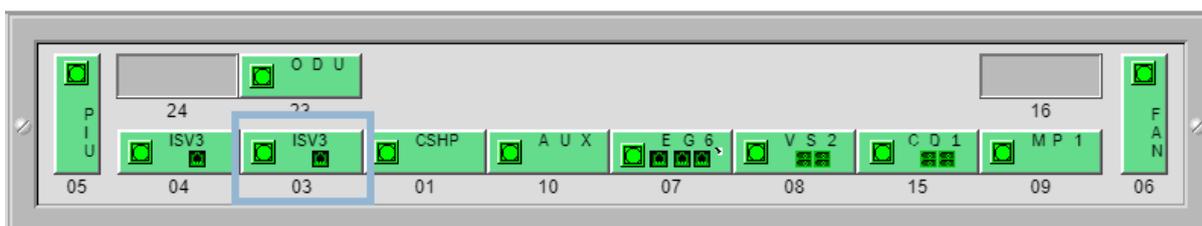


Figura 3.30: Vista en gestor del equipo destino (RTN 905 2E) del Site B.

3.8. Presupuesto

En definitiva, el equipamiento necesario para realizar este trabajo será:

- Una tarjeta ISV3 para el equipo origen.
- Un equipo RTN905 2E para la localización destino.
- Una ODU XMC-2 para el equipo destino.
- Dos parábolas UHPM de polarización única y diámetro de 0.6 m.

Los precios aproximados de cada uno de los elementos se recogen en la Tabla 3.3.

Elemento	Precio
Tarjeta ISV3	140 €
RTN905 2E	330 €
ODU XMC-2	440 €
Parábola UHMP SP 6.0 m	160 €

Tabla 3.3: Listado de precios aproximados de los equipos necesarios.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los equipos y las cantidades necesarias, el coste del equipamiento de este trabajo asciende a un total de 1230 euros.

Capítulo 4

Conclusiones

4.1. Conclusiones

Como se ha podido comprobar, se han alcanzado con éxito los objetivos propuestos inicialmente. Se ha realizado el *swap* del radioenlace diseñado en la banda de 26 GHz, presentando tres propuestas de diseño en las bandas contiguas de 38, 23 y 18 GHz, siempre usando como partida el enlace inicial. Además, se han descrito los conceptos básicos para entender la topología de la red actual, así como los cambios necesarios para su adaptación a la introducción de 5G NR.

Se han descrito también las variables que influyen en la propagación de las ondas electromagnéticas, y por ende, en el planteamiento de los radioenlaces.

A continuación, se ha hecho un primer diseño en cada banda y se han ido ajustando parámetros tales como el tamaño de antenas, la modulación o la potencia, para que se cumpliesen los niveles adecuados de capacidad, disponibilidad ante lluvia e interferencias.

Después, se ha decidido que el diseño en la banda de 23 GHz era el más adecuado siguiendo los criterios de utilización del espectro, potencia e interferencias. También se han seleccionado los equipos convenientes según el estado del material que conformaba el radioenlace actual. En concreto, se ha podido reutilizar el equipo origen, aunque ha sido necesario pedir un nuevo equipo radio para la localización de destino, debido a que el RTN actual era un equipo *legacy*. Finalmente, se ha planteado un presupuesto aproximado de su coste.

4.2. Futuras líneas de trabajo

Como futura línea de trabajo, habría sido interesante incluir el proceso completo que se ha de llevar a cabo cuando se realiza el cambio de banda de un radioenlace. Sin embargo, debido a que sobrepasaría la extensión permitida en este trabajo, se resumirá de forma general el procedimiento.

4.2.1. Proceso completo del cambio de banda de un radioenlace

Primero, se han de identificar los radioenlaces afectados y ordenarlos en función de su prioridad, según criterios tales como el acceso a los emplazamientos, las localizaciones en las que se encuentran, la capacidad requerida, si forman parte de una cadena o si son radioenlaces pertenecientes a la última milla o a la red de agregación.

Después, se realiza el diseño, desarrollado en este trabajo, y se presenta al cliente para obtener su aprobación.

Una vez el cliente aprueba el diseño, se redacta la orden de trabajo, en la cual se explican las características del diseño, las acciones a realizar en campo, se prepara la gestión de los equipos, su integración en la red y los gestores y se indica el material que será necesario para realizar el trabajo. Tras recibir el material, se planifica el apagado del radioenlace actual y el encendido del nuevo, tanto físicamente como en los gestores de red. Con el fin de generar el menor impacto en la red, siempre

que sea posible, se pre-instala el nuevo radioenlace en paralelo al actual, y una vez los dos funcionan de forma correcta, se migra el tráfico de uno al otro, para, a continuación, apagar de forma definitiva el vano en 26 GHz. Entonces, se deja un margen de tiempo para comprobar que el enlace se haya apagado de forma adecuada y se haya integrado correctamente el nuevo. Además, en este tiempo se ha de comunicar, en caso de ser necesario, el replanteo del enlace recién integrado.

Finalmente, cuando se ha confirmado que el trabajo ha sido completado de forma adecuada, se actualizan las herramientas y las bases de datos con el nuevo estado de la red.

Bibliografía y referencias

- [1] A. Bergman y Jana lyengar. *How COVID-19 is affecting internet performance*. 2020. URL: <https://www.fastly.com/blog/how-covid-19-is-affecting-internet-performance>.
- [2] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). *Orden ETU/416/2018*. 20 de abril de 2018. URL: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-5704.
- [3] 3GPP. *Release 15*. 26 de abril de 2019. URL: <https://www.3gpp.org/release-15>.
- [4] Dirección general de telecomunicaciones y tecnologías de la información. *Consulta pública sobre el modelo de gestión de las bandas de frecuencias de 700 MHz (694 A 790 MHz), 1,5 GHz (1.427 A 1.517 MHz) Y 26 GHz (24,25 A 27,50 GHz)*. 2019. URL: <https://avancedigital.mineco.gob.es/es-es/Participacion/Documents/modelo-gestion-bandas-frecuencias.pdf>.
- [5] Cuadro Nacional de Atribución de frecuencias (CNAF). URL: <https://avancedigital.mineco.gob.es/espectro/Paginas/cnaf.aspx>.
- [6] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT. *Reglamento de Radiocomunicaciones*. URL: <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR/es>.
- [7] Cuadro Nacional de Atribución de frecuencias (CNAF). *Notas de Utilización Nacional (UN)*.
- [8] A. Artés, F. Pérez, J. Cid, R. López y C. Mosquera. *Comunicaciones Digitales*. 2012.
- [9] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). *Recomendación UIT-R P.525-4*. Agosto de 2019. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-I!!PDF-S.pdf.
- [10] A. Cardama, L. Jofré, J.M. Rius, J. Romeu y S. Blanch. *Antenas*. Ed. UPC.
- [11] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). *Recomendación UIT-R P.526-15*. Octubre de 2019. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-15-201910-I!!PDF-S.pdf.
- [12] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). *Recomendación UIT-R P.676-12*. Agosto de 2019. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-I!!PDF-S.pdf.
- [13] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). *Recomendación UIT-R P.530-17*. Diciembre de 2012. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-17-201712-I!!PDF-S.pdf.
- [14] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). *Recomendación UIT-R P.837-7*. Junio de 2017. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-7-201706-I!!PDF-S.pdf.
- [15] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). *Recomendación UIT-R P.838-3*. Marzo de 2005.
- [16] J.M. Hernando Rábanos. *Transmisión por radio*.

