



Diseño de un sistema de comunicaciones inalámbricas punto a multipunto basado en técnicas de reducción de interferencias

Aitor Morales Hernández

Tutor: Francisco Ramos Pascual

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela
Técnica Superior de Ingenieros de
Telecomunicación de la Universitat Politècnica
de València, para la obtención del Título de
Graduado en Ingeniería de Tecnologías y
Servicios de Telecomunicación

Curso 2013-14

Valencia, 14 de julio de 2014

*A mi madre, por ser la persona más valiente que vaya a poder conocer
A mi padre, por haber estado tan atento de ella durante todo este año*

Agradecimientos

Es difícil poder agradecer en pocas líneas a toda aquella persona que me haya acompañado durante todo el desarrollo de este trabajo, y en general durante todos mis estudios. La ocasión además no sólo merece dar las gracias por ese motivo, sino por el apoyo que he recibido ya sea directa o indirectamente de todas las personas que me aprecian y valoran ante las circunstancias que me han llegado durante todo este año atrás con el fallecimiento de mi querida madre, que estoy seguro de lo orgullosa que estaría de mí en estos momentos.

Si debo destacar un nombre en particular es el del tutor de este trabajo, Dr. Francisco Ramos Pascual, por haber estado tan atento siempre a todas mis consultas. El resultado de este proyecto ha sido posible gracias a un esfuerzo conjunto de ambos.

Por último, también quisiera resaltar especialmente la compañía y preocupación que me brindan cada día mi familia, pareja y amigos. Si escribo hoy estas palabras, también es gracias a vosotros.

Resumen

Con el rápido avance de la tecnología y el creciente desarrollo de los sistemas de banda ancha, se hace necesario realizar estudios previos sobre el diseño de una red de comunicaciones a implantar en una zona.

Para el caso de redes punto a multipunto en las cuales existen múltiples radioenlaces próximos, es importante tener en cuenta las interferencias que estos pueden provocar al trabajar a una misma frecuencia. El hecho de no analizar primeramente la existencia de estas posibles señales no deseadas podrá provocar que el sistema diseñado, una vez esté implantado, tenga un ineficiente funcionamiento.

En este trabajo se procederá a realizar el estudio y simulación de cómo las interferencias pueden perjudicar a la señal útil de un radioenlace para distintos anchos de banda y modulaciones, así como analizar, proponer y contrastar posibles soluciones al respecto, mostrando resultados obtenidos mediante la herramienta *LinkPlanner*.

Finalmente se propondrá un diseño real adjuntando planos, listado de componentes y presupuesto final, en el cual se aplicarán las técnicas descritas para maximizar la capacidad del sistema y conseguir que éste sea lo más eficiente posible.

Resum

Amb el ràpid avanç de la tecnologia y el creixent desenvolupament dels sistemes de banda ampla, es fa necessari realitzar estudis previs sobre el disseny d'una xarxa de comunicacions a implantar en una zona.

Per al cas de xarxes punt a multipunt en les quals existeixen múltiples radioenllaços pròxims, és important tenir en compte les interferències que aquests poden provocar al treballar a una mateixa freqüència. El fet de no analitzar primerament l'existència d'aquestes possibles senyals no desitjades podrà provocar que el sistema dissenyat, una vegada estiga implantat, tinga un ineficient funcionament.

En aquest treball es procedirà a realitzar l'estudi i simulació de com les interferències poden perjudicar la senyal útil d'un radioenllaç per a diferents amplituds de banda i modulacions, així com analitzar, proposar i contrastar possibles solucions, mostrant resultats obtinguts mitjançant l'eina *LinkPlanner*.

Finalment es proposarà un disseny real adjuntant plans, llistat de components i pressupost final, en el qual s'aplicaran les tècniques descrites per a maximitzar la capacitat del sistema i aconseguir que aquest siga el més eficient possible.

Abstract

With the quick progress of the technology and the increasing development of broadband systems, it is necessary to review the design of a communications network over a given area.

For point-to-multipoint networks in which there are close radio links, it is important to take into account the interferences which appear in the same frequency bands. If we don't keep in mind these undesired signals during the design process it is possible that the designed system (once it is implemented) can have high degradations and consequently a low performance.

In this project we shall carry out the study and simulation of how interferences can damage the useful signal from a radio-link with different bandwidths and modulations, as well as analyze, propose and contrast potential solutions to it from simulations results of software *LinkPlanner*.

Finally a real design will be proposed using the described techniques to maximize the system capacity and ensure that it is as efficient as possible. The project will include some design plans, a list of components and the final budget.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Acceso inalámbrico de banda ancha	8
1.2 Banda de 18 GHz (UN – 69).....	9
1.3 Focalización del presente trabajo.....	11
Capítulo 2. Objetivos del TFG	13
Capítulo 3. Metodología	14
3.1 Gestión del proyecto	14
3.2 Distribución en tareas.....	16
3.3 Diagrama temporal	19
Capítulo 4. Desarrollo y resultados	20
4.1 Introducción.....	20
4.1.1 Metodología de trabajo.....	20
4.1.2 Especificaciones de la red de estudio	20
4.1.3 Cálculo de interferencias.....	24
4.2 Comparativa entre modulaciones	26
4.2.1 Ancho de banda de 10 MHz	26
4.2.2 Ancho de banda de 40 MHz	28
4.2.3 Ancho de banda de 80 MHz	31
4.3 Comparativa entre anchos de banda	34
4.3.1 Modulación QPSK.....	34
4.3.2 Modulación 16QAM.....	36
4.3.3 Modulación 64QAM.....	38
4.3.4 Modulación 256QAM.....	40
4.4 Resultados mediante la aplicación de técnicas de reducción de interferencias	42
4.4.1 Comparativa aplicando canalización en frecuencia	42
4.4.2 Comparativa aplicando polarizaciones cruzadas	49
Capítulo 5. Pliego de condiciones	53
5.1 Metodología de trabajo.....	53
5.2 Planos de la red	53

5.3	Características de la red y los equipos.....	55
5.4	Requisitos del diseño y resultados alcanzables	56
5.5	Resultados	58
5.6	Características finales de cada radioenlace.....	60
5.6.1	Villarta de San Juan - Arenas de San Juan.....	60
5.6.2	Villarta de San Juan - Villarrubia de los Ojos	61
5.6.3	Villarta de San Juan - Las Labores	62
5.7	Presupuesto de ejecución	63
Capítulo 6.	Conclusiones y propuesta de trabajo futuro	64
Capítulo 7.	Bibliografía.....	66
Capítulo 8.	Anexos	67
8.1	ANEXO I - Características de los equipos utilizados	67

Índice de figuras

Figura 1.1 - <i>Regiones para la atribución de las bandas de frecuencias</i>	10
Figura 1.2 - <i>Canalización de la banda de 17,7-19,7 GHz</i>	11
Figura 1.3 - <i>Topología punto a multipunto como sistema de distribución</i>	12
Figura 1.4 - <i>Topología punto a multipunto como conjunto de radioenlaces punto a punto</i>	12
Figura 4.1 - <i>Red para el caso de estudio</i>	20
Figura 4.2 - <i>Representación 3D de la red en Google Earth</i>	21
Figura 4.3 - <i>Características de los equipos</i>	22
Figura 4.4 - <i>Características de las antenas</i>	24
Figura 4.5 - <i>Diseño con señal interferente</i>	24
Figura 4.6-a - <i>Disponibilidad para 10 MHz en ausencia de interferencias</i>	27
Figura 4.6-b - <i>Throughput para 10 MHz en ausencia de interferencias</i>	27
Figura 4.7 - <i>Disponibilidad para 10 MHz afectada por interferencias</i>	28
Figura 4.8-a - <i>Disponibilidad para 40 MHz en ausencia de interferencias</i>	29
Figura 4.8-b - <i>Throughput para 40 MHz en ausencia de interferencias</i>	29
Figura 4.9-a - <i>Disponibilidad para 40 MHz afectada por interferencias</i>	30
Figura 4.9-b - <i>Throughput para 40 MHz afectado por interferencias</i>	30
Figura 4.10-a - <i>Disponibilidad para 80 MHz en ausencia de interferencias</i>	31
Figura 4.10-b <i>Throughput para 80 MHz en ausencia de interferencias</i>	32
Figura 4.11-a - <i>Disponibilidad para 80 MHz afectada por interferencias</i>	32
Figura 4.11-b - <i>Throughput para 80 MHz afectado por interferencias</i>	33
Figura 4.12-a - <i>Disponibilidad para QPSK en ausencia de interferencias</i>	34
Figura 4.12-b - <i>Throughput para QPSK en ausencia de interferencias</i>	35
Figura 4.13-a - <i>Disponibilidad para QPSK afectada por interferencias</i>	35
Figura 4.13-b - <i>Throughput para QPSK afectado por interferencias</i>	36
Figura 4.14-a - <i>Disponibilidad para 16QAM en ausencia de interferencias</i>	36
Figura 4.14-b - <i>Throughput para 16QAM en ausencia de interferencias</i>	37
Figura 4.16-a - <i>Disponibilidad para 64QAM en ausencia de interferencias</i>	38
Figura 4.16-b - <i>Throughput para 64QAM en ausencia de interferencias</i>	38
Figura 4.17-a - <i>Disponibilidad para 64QAM afectada por interferencias</i>	39

Figura 4.17-b - <i>Throughput para 64QAM afectado por interferencias</i>	40
Figura 4.18-a - <i>Disponibilidad para 256QAM en ausencia de interferencias</i>	40
Figura 4.18-b - <i>Throughput para 256QAM en ausencia de interferencias</i>	41
Figura 4.19 - <i>Solapamiento de dos canales adyacentes</i>	44
Figura 4.20 - <i>Resultados de disponibilidad para la modulación QPSK y un ancho de banda de 20 MHz aplicando canalización en frecuencia</i>	45
Figura 4.21 - <i>Resultados de disponibilidad para la modulación 16QAM y un ancho de banda de 20 MHz aplicando canalización en frecuencia</i>	45
Figura 4.22 - <i>Resultados de throughput para la modulación 16QAM y un ancho de banda de 20 MHz aplicando canalización en frecuencia</i>	46
Figura 4.23 - <i>Resultados de disponibilidad para la modulación 64QAM y un ancho de banda de 80 MHz aplicando canalización en frecuencia</i>	46
Figura 4.24 - <i>Resultados de throughput para la modulación 64QAM y un ancho de banda de 80 MHz aplicando canalización en frecuencia</i>	47
Figura 4.25 - <i>Resultados de disponibilidad para la modulación 256QAM y un ancho de banda de 30 MHz aplicando canalización en frecuencia</i>	47
Figura 4.26 - <i>Resultados de throughput para la modulación 256QAM y un ancho de banda de 30 MHz aplicando canalización en frecuencia</i>	48
Figura 4.27 - <i>Polarización vertical (azul) y polarización horizontal (rojo)</i>	49
Figura 4.28 - <i>Resultados de disponibilidad para la modulación QPSK y un ancho de banda de 40 MHz aplicando polarizaciones cruzadas</i>	50
Figura 4.29 - <i>Resultados de disponibilidad para la modulación 16QAM y un ancho de banda de 40 MHz aplicando polarizaciones cruzadas</i>	51
Figura 4.30 - <i>Resultados de throughput para la modulación 64QAM y un ancho de banda de 40 MHz aplicando polarizaciones cruzadas y canalización en frecuencia</i>	51
Figura 4.31 - <i>Resultados de throughput para la modulación 256QAM y un ancho de banda de 80 MHz aplicando polarizaciones cruzadas y canalización en frecuencia</i>	52
Figura 5.1 - <i>Plano aéreo de la red punto a multipunto</i>	54
Figura 5.2 - <i>Orografía para el enlace con Arenas de San Juan</i>	54
Figura 5.3 - <i>Orografía para el enlace con Villarrubia de los Ojos</i>	54
Figura 5.4 - <i>Orografía para el enlace con Las Labores</i>	54
Figura 6.1 - <i>Captura de pantalla de Icinga</i>	65

Índice de tablas

Tabla 4.1 - <i>Posición del transmisor y los receptores, y distancia entre ellos</i>	22
Tabla 4.2 - <i>Características del diseño con señal interferente</i>	25
Tabla 4.3 - <i>Posibles modulaciones y ratios de codificación para cada ancho de banda a 18 GHz</i>	26
Tabla 4.4 - <i>Selectividad de canal adyacente para distintos tipos de modulaciones</i> .	43
Tabla 4.5 - <i>Selectividad de canal adyacente y caída en frecuencia para distintos tipos de modulaciones digitales</i>	43
Tabla 4.6 - <i>NLPS para un ángulo de 5° para las distintas polarizaciones de la antena HPLP1-18 de Radiowaves Inc.</i>	49
Tabla 5.1 - <i>Posición geográfica y distancia para cada estación base</i>	55
Tabla 5.2 - <i>Separación angular entre los radioenlaces</i>	55
Tabla 5.3 - <i>NLPS en función del ángulo para polarización VV</i>	55
Tabla 5.4 - <i>NLPS en función del ángulo para polarización HV</i>	55
Tabla 5.5 - <i>NLPS en función del ángulo para polarización HH</i>	56
Tabla 5.6 - <i>NLPS en función del ángulo para polarización VH</i>	56
Tabla 5.7 - <i>Características de los radioenlaces</i>	56
Tabla 5.8 - <i>Disponibilidad y throughput máximos alcanzables para Arenas de San Juan</i>	57
Tabla 5.9 - <i>Disponibilidad y throughput máximos alcanzables para Villarrubia de los Ojos</i>	57
Tabla 5.10 - <i>Disponibilidad y throughput máximos alcanzables para Las Labores</i>	57
Tabla 5.11 - <i>Modulación y ancho de banda para cada radioenlace</i>	57
Tabla 5.12 - <i>Disponibilidad y throughput para un mismo canal en frecuencia y polarización vertical</i>	58
Tabla 5.13 - <i>Disponibilidad y throughput para un mismo canal en frecuencia y polarización horizontal</i>	58
Tabla 5.14 - <i>Polarización para cada radioenlace</i>	58
Tabla 5.15 - <i>Disponibilidad y throughput para un mismo canal en frecuencia y polarizaciones cruzadas entre radioenlaces adyacentes</i>	59
Tabla 5.16 - <i>Canales en transmisión y recepción para cada radioenlace</i>	59
Tabla 5.17 - <i>Disponibilidad y throughput aplicando polarizaciones cruzadas y canalización en frecuencia</i>	59

Tabla 5.18 - <i>Características finales del enlace a Arenas de San Juan</i>	60
Tabla 5.19 - <i>Características finales del enlace a Villarrubia de los Ojos</i>	61
Tabla 5.20 - <i>Características finales del enlace a Las Labores</i>	62

Capítulo 1. Introducción

1.1 Acceso inalámbrico de banda ancha

Tal y como puede observarse día tras día, el crecimiento de la demanda de los usuarios por el acceso a servicios de banda ancha tales como pueden ser servicios de voz, audio, vídeo y especialmente datos a alta velocidad, es cada vez mayor.

Estos servicios de banda ancha permiten a los usuarios disponer de elevadas tasas de transmisión a través de sus dispositivos (ya sean ordenadores, tabletas, móviles, etc...), pudiendo ser consideradas conexiones de este tipo aquellas que ofrezcan velocidades de descarga por encima de los 144 kbit/s.

El acceso a servicios de banda ancha puede prestarse utilizando distintos tipos y combinaciones de tecnologías, clasificándose especialmente en sistemas cableados o inalámbricos, y pudiendo estos complementarse mutuamente según cada caso de diseño. Habrá por lo tanto que tener en cuenta las características particulares de cada una de ellas y cómo afectarán a la capacidad de la red.

Cuando se quiera realizar el diseño de una red será necesario tener en cuenta el tipo de servicio que se va a querer prestar, el entorno donde se quiera desarrollar así como el coste que va a suponer, junto con otros factores, para realizar una adecuada elección de la tecnología a utilizar. Una de las soluciones más económicas y con mayor rapidez de despliegue a día de hoy son los sistemas inalámbricos de banda ancha, por lo que constituirán una de las alternativas más asequibles y óptimas para el diseño de una red. No obstante se tendrán que tener en cuenta también los inconvenientes que estos proporcionarán frente a los sistemas cableados, como son por ejemplo las interferencias por el hecho de hacer uso de un medio compartido como lo es el aire.

En el presente trabajo se abarcará el estudio de las características de una red inalámbrica punto a multipunto basada en técnicas de reducción de interferencias, las cuales afectarán gravemente al funcionamiento y estado de la red. Finalmente se propondrá un diseño real de un sistema de este tipo haciendo uso de dichas técnicas para conseguir la máxima capacidad y eficiencia posible.

1.2 Banda de 18 GHz (UN – 69)

Cuando se quiere realizar el diseño de un sistema inalámbrico se hace necesario tomar una decisión importante, y es en qué banda de frecuencias es en la que se va a querer trabajar, ya que dependiendo de cuál de ellas sea escogida variará el alcance y calidad de la señal. Podrá hacerse uso de bandas sin licencia como son la de 5,8 GHz, pero no obstante habrá que tener en cuenta que habrá mayor probabilidad de que existan otros sistemas próximos que también hagan uso de ellas, pudiendo dar lugar a interferencias que impidan un correcto funcionamiento de la red.

Otra de las alternativas será recurrir a una banda licenciada, que a pesar de tener un mayor impacto económico en el presupuesto final del diseño, asegurará poder controlar en mayor medida las interferencias, al menos, con otros sistemas ajenos. Durante todo el desarrollo del presente trabajo, se va a hacer uso de una banda licenciada de frecuencias, siendo ésta la de 18 GHz.

El instrumento legal que en España se encarga de la atribución de bandas de frecuencia para cada uno de los servicios radioeléctricos, indicando además las características técnicas que estos deben cumplir, como por ejemplo la asignación de canales o la potencia máxima de emisión permitida, es el CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias), dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Se crean notas de Utilización Nacional (UN) que indican estas características para cada una de las bandas de frecuencias comprendidas entre los 9 kHz y los 275 GHz.

Para el caso de la banda de 18 GHz, la correspondiente nota de Utilización Nacional es la UN-69. Tal y como durante el desarrollo de este trabajo se observará, dentro de esta banda se hará uso de la parte baja del espectro comprendida entre los 17,7 GHz y los 18,1 GHz para un sentido de transmisión de datos de un radioenlace; y la parte alta del espectro comprendida entre los 19,3 GHz y los 19,7 GHz para el otro sentido de transmisión de datos.

El documento del CNAF vigente en el momento de la redacción de estas líneas es el del año 2013. Tal y como se observa en la figura 1.1, la superficie del planeta estará dividida en tres regiones, estando España situada en la primera de ellas. Con este dato podrá ya acudir a la correspondiente tabla de atribución de frecuencias para UN-69, y se comprobará que los usos que se le dan a esta banda de frecuencias serán de uso privativo o reservado al Estado, pudiendo pertenecer a uno de los siguientes tres tipos:

- *Servicio fijo*: Servicio de radiocomunicación entre puntos fijos determinados
- *Servicio fijo por satélite*: Servicio de radiocomunicación entre estaciones terrenas cuando se utilizan uno o más satélites.
- *Servicio móvil*: Servicio de radiocomunicación entre estaciones móviles y estaciones terrestres, o entre estaciones móviles.

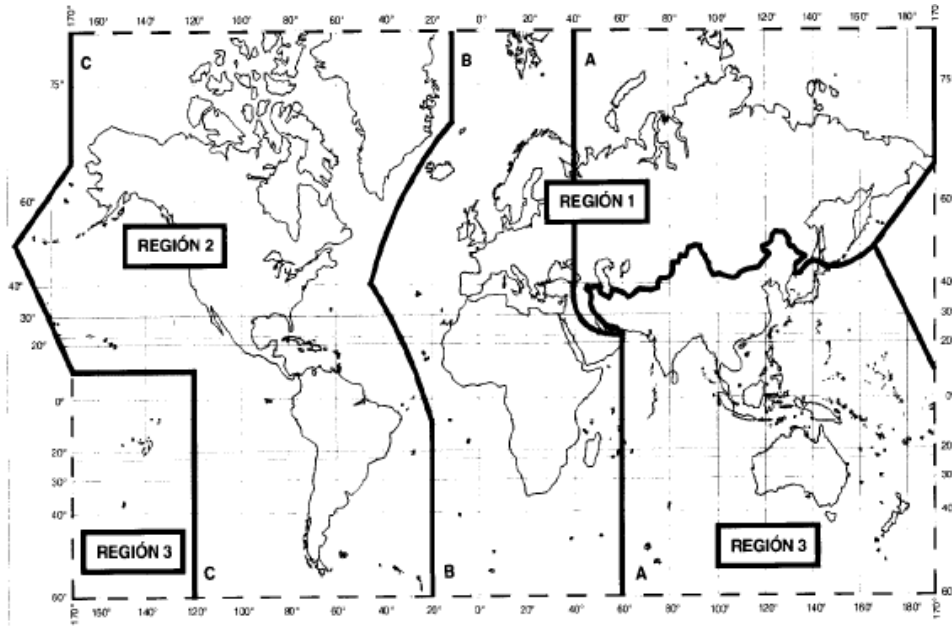


Figura 1.1 - Regiones para la atribución de las bandas de frecuencias

Es importante comentar también que la banda de frecuencias comprendida entre los 17,7 GHz y los 19,7 GHz se destinará para radioenlaces fijos digitales de capacidad elevada, media y reducida, incluyendo la infraestructura móvil, según indica la recomendación UIT-R F.595-10 (*Disposición de radiocanales para sistemas inalámbricos fijos que funcionan en la banda de frecuencias 17,7-19,7 GHz*).

Según este documento se recomienda optar por 4, 8, 17 o 35 canales bidireccionales según la canalización escogida (ecuaciones 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4) y con una separación entre transmisión y recepción de 1010 MHz. La representación gráfica de esta distribución de canales para la banda de 18 GHz puede observarse en la figura 1.2.

$$\text{Para pasos de 220 MHz} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_n = F_r - 1110 + 220 \cdot n \quad [\text{MHz}] \\ F'_n = F_r + 10 + 220 \cdot n \quad [\text{MHz}] \end{array} \right\}; n = 1, \dots, 4 \quad (1.1)$$

$$\text{Para pasos de 110 MHz} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_n = F_r - 1000 + 110 \cdot n \quad [\text{MHz}] \\ F'_n = F_r + 10 + 110 \cdot n \quad [\text{MHz}] \end{array} \right\}; n = 1, \dots, 8 \quad (1.2)$$

$$\text{Para pasos de 55 MHz} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_n = F_r - 1000 + 55 \cdot n \quad [\text{MHz}] \\ F'_n = F_r + 10 + 55 \cdot n \quad [\text{MHz}] \end{array} \right\}; n = 1, \dots, 17 \quad (1.3)$$

$$\text{Para pasos de 27,5 MHz} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_n = F_r - 1000 + 27,5 \cdot n \quad [\text{MHz}] \\ F'_n = F_r + 10 + 27,5 \cdot n \quad [\text{MHz}] \end{array} \right\}; n = 1, \dots, 35 \quad (1.4)$$

siendo $\left\{ \begin{array}{l} F_r \text{ la frecuencia central de la banda (18700 MHz)} \\ F_n \text{ la frecuencia central de un radiocanal de la mitad inferior de la banda} \\ F'_n \text{ la frecuencia central de un radiocanal de la mitad superior de la banda} \end{array} \right\}$

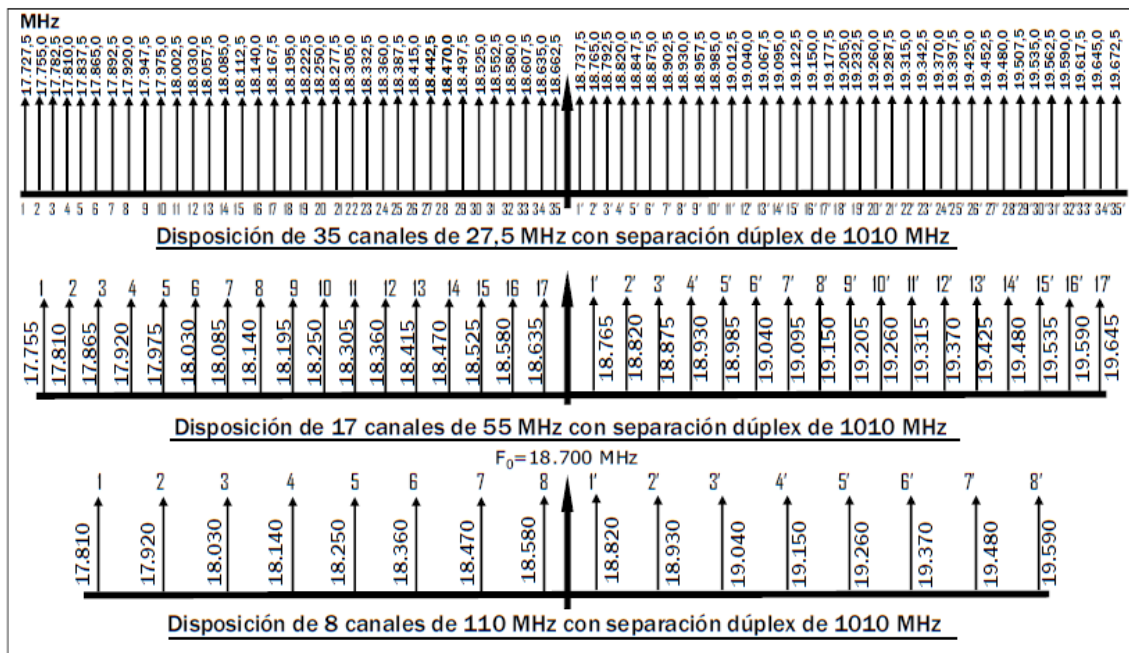


Figura 1.2 - Canalización de la banda de 17,7-19,7 GHz

1.3 Focalización del presente trabajo

Tras esta breve introducción sobre la banda de frecuencias de 18 GHz, que será la utilizada durante todo el desarrollo del presente trabajo, es importante destacar un matiz sobre cómo irá encaminado el estudio que a continuación se mostrará con su posible implantación real.

En todo momento se hablará de una red con una topología punto a multipunto. No obstante es importante marcar la diferencia entre dos tipos de sistemas con esta misma topología. El sistema más común definido de esta forma es aquel cuyo nodo común es compartido por todos los equipos clientes, es decir, se interpreta como un sistema de distribución (*broadcast*) en el que todos los usuarios conectados a la estación base reciben la misma información. Este diseño sería como el representado en la figura 1.3.

No obstante, el caso de estudio y diseño que a continuación se presentarán, no debe interpretarse como el anteriormente comentado. La correcta interpretación será el imaginar un conjunto de radioenlaces punto a punto con la característica que uno de los extremos de cada uno de ellos estará situado en un mismo lugar para todos los radioenlaces. Este hecho implicará que cada enlace no tiene por qué transportar necesariamente la misma información, y es por ello por lo que se hace necesario aplicar técnicas de reducción de interferencias, ya que en uno de los extremos todos los equipos están muy próximos entre sí. Esta segunda representación se muestra en la figura 1.4, donde podrá contrastarse la diferencia respecto al otro caso de topología punto a multipunto comentado.

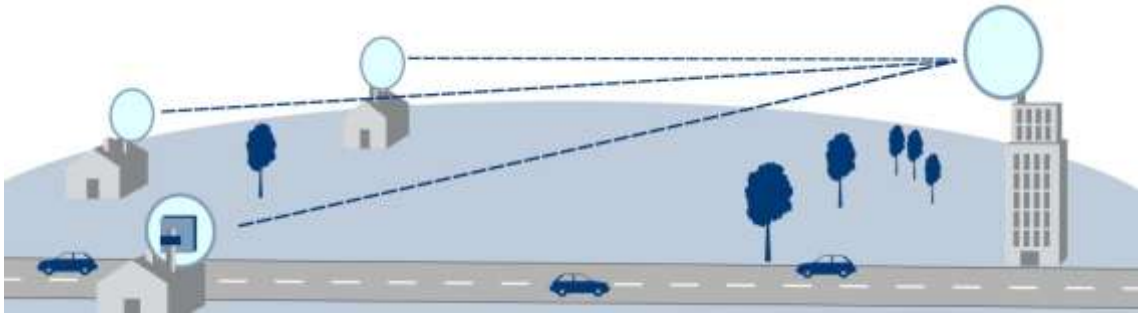


Figura 1.3 - *Topología punto a multipunto como sistema de distribución*

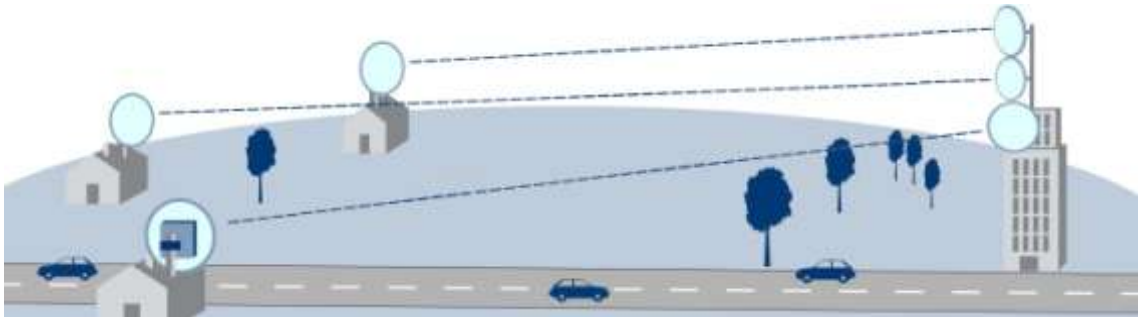


Figura 1.4 - *Topología punto a multipunto como conjunto de radioenlaces punto a punto*

Capítulo 2. Objetivos del TFG

Tal y como se ha comentado en el capítulo 1, el objetivo de este trabajo será realizar un estudio de cómo afectan las interferencias en un sistema de comunicaciones inalámbricas punto a multipunto donde todos los radioenlaces trabajan a una misma frecuencia. Dicho estudio analizará el comportamiento para distintos tipos de modulaciones y anchos de banda, proponiendo seguidamente el uso de técnicas para atenuar el efecto negativo provocado por las interferencias. Los resultados obtenidos cuando estas técnicas sean empleadas también se presentarán para poder contrastarlos con el caso anterior.

Por último se propondrá un diseño real de una red punto a multipunto donde se haga uso de las técnicas propuestas, para así conseguir un menor efecto de las interferencias y consecuentemente poder aumentar la capacidad del sistema. Se adjuntarán también los planos, características de los equipos utilizados y presupuesto final.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Gestión del proyecto

La línea de evolución que ha tenido este trabajo se puede dividir en varios puntos importantes. El primero de ellos fue en junio de 2013, cuando tras seleccionar el tutor con quién se quería realizar el presente trabajo (Dr. Francisco Ramos Pascual) se cerró el tema que se trataría en él. Una vez dio comienzo en febrero el segundo cuatrimestre del curso 2013/2014, hubo una primera reunión con el tutor para realizar una planificación inicial y preparar las primeras pruebas a efectuar, habiendo hecho una lectura de documentación previa del manual del software que se utilizaría.

De forma paralela a las dos asignaturas que se estaban cursando durante los meses de febrero, marzo y abril, se iban realizando las primeras pruebas en el diseño de una red con la funcionalidad *PTP-SYNC* que incluyen los equipos PTP-650 de *Cambium Networks*, que permite planificar una sincronización temporal entre distintos radioenlaces, con el fin de estudiar y comprobar la reducción de interferencias mediante dicha función.

Durante los tres meses, y tras numerosas pruebas con la opción *PTP-SYNC* no se conseguían obtener resultados positivos con la ayuda del software utilizado. Se realizaban pruebas evidentes, y se llegó a suponer que el programa no funcionaba correctamente para dicha funcionalidad.

Se tuvo contacto a través de correo electrónico numerosas veces con el servicio técnico de *Cambium Networks*, intentado conseguir una respuesta ante los problemas que surgían. Las evasivas del servicio técnico fueron continuadas, hasta el punto de finalmente dejar de responder a las consultas realizadas. Seguidamente se decidió contactar más concretamente con el servicio técnico de *Cambium Networks* en España, y tras un mes intentando obtener una respuesta, finalmente se me concedió una reunión vía *Skype* con la que se pudieran resolver mis dudas. En la fecha y hora de dicha reunión, nunca se volvió a tener respuesta del servicio técnico de esta empresa.

Paralelamente a todo el proceso anterior se tuvieron también diversas reuniones con el tutor del trabajo, hasta que finalmente, a mediados del mes de mayo, se decidió realizar un cambio de estrategia con el que aplicar como técnicas de reducción de interferencias hacer uso de distintas polarizaciones y canales en frecuencia, dejando de lado los estudios relacionados con la sincronización temporal, tras efectivamente observar que *LinkPlanner* no realizaba unas simulaciones correctas.

Con el comienzo de este segundo estudio a lo largo de tres semanas se comenzaron a obtener numerosos resultados positivos que se organizaban en documentos *Excel*, con los que posteriormente poder obtener representaciones gráficas con la ayuda de *Matlab*. Es importante destacar también que durante todo el proceso se ha tenido contacto continuado con Francisco Ramos, ya fuera por correo electrónico o llamada telefónica, para la verificación de que los resultados obtenidos eran correctos y el desarrollo del trabajo seguía un buen camino.

Una vez se tenían recogidos todos los datos previstos según la planificación previa, se comenzaba con la redacción de la presente memoria, en la que se exponen y explican todos ellos, así como finalmente se aplican en el diseño de una red real.

Por último, una vez la memoria estuvo completamente redactada, se comenzó a elaborar una presentación con la ayuda de *Power Point* para utilizar como apoyo durante la defensa del presente trabajo frente a un tribunal.

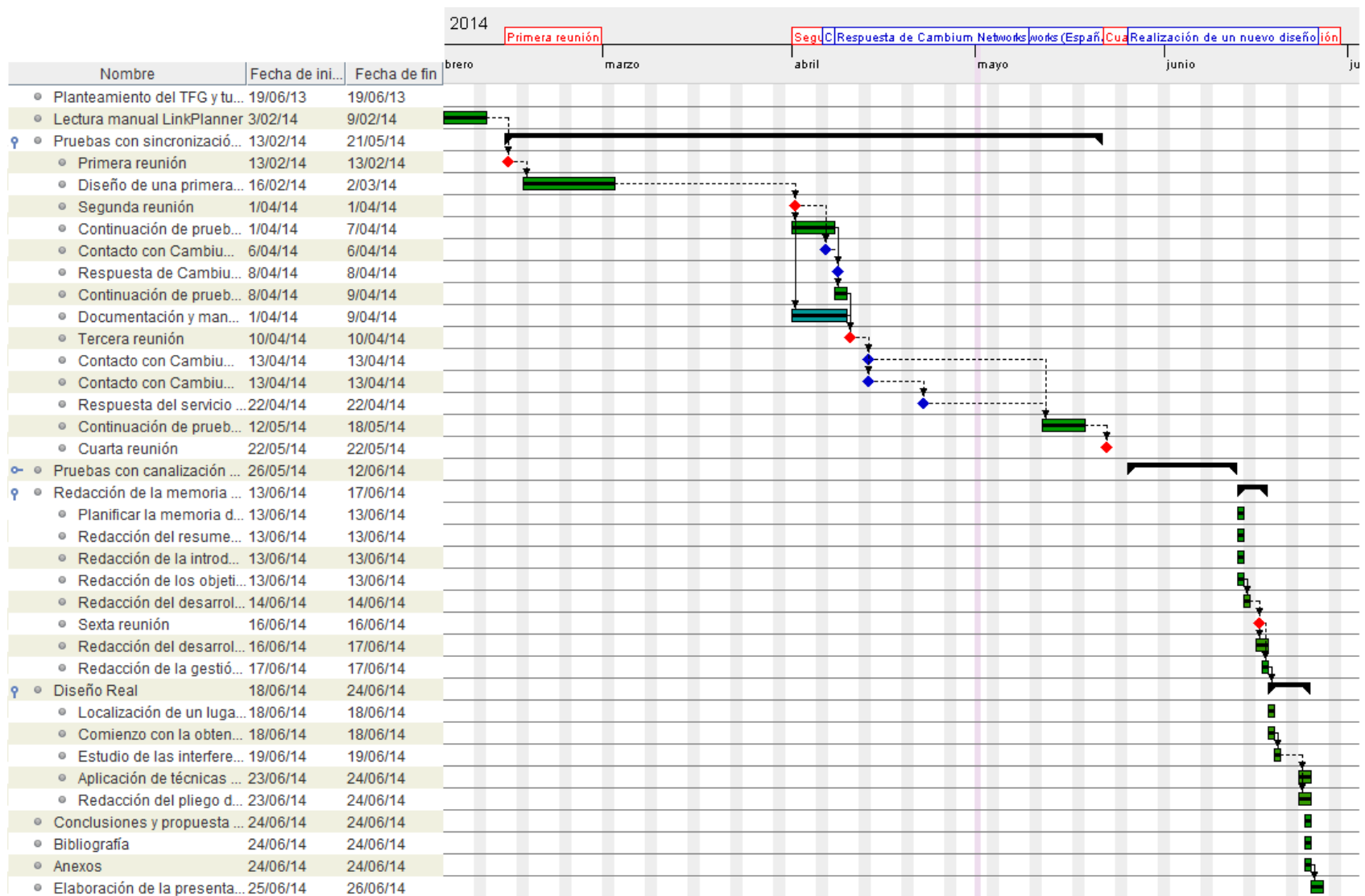
3.2 Distribución en tareas

Tarea	Fecha de inicio	Fecha de fin
Planteamiento del TFG y tutor	19/06/2013	19/06/2013
Lectura del manual de <i>LinkPlanner</i>	03/02/2014	09/02/2014
Pruebas con sincronización temporal	13/02/2014	18/05/2014
Primera reunión <i>Propuestas para las primeras pruebas</i>	13/02/2014	13/02/3014
Diseño de una primer red <i>Primeras pruebas con la opción PTP-SYNC de los equipos PTP-650 de Cambium Networks</i>	16/02/2014	02/03/2014
Segunda reunión <i>Seguimiento del TFG</i>	01/04/2014	01/04/2014
Continuación de pruebas PTP-SYNC <i>Pruebas con la sincronización temporal para valores de throughput y disponibilidad en función de la distancia y ángulo</i>	01/04/2014	07/04/2014
Documentación y manuales <i>Lectura de manuales y documentación relacionada con los equipos de Cambium Networks.</i>	01/04/2014	09/04/2014
Contacto con Cambium Networks <i>Solicitud de información sobre la función de sincronización temporal (PTP-SYNC) de los equipos PTP-650 al servicio técnico de Cambium Networks</i>	06/04/2014	06/04/2014
Respuesta de Cambium Networks <i>Respuesta del servicio técnico de Cambium Networks ante mi solicitud de información de la función PTP-SYNC de sincronización temporal de sus equipos PTP-650. Me hacen llegar el documento PTP600-Collocation</i>	08/04/2014	08/04/2014
Continuación de pruebas PTP-SYNC <i>Se continúan haciendo pruebas sobre la función PTP-SYNC con la ayuda del documento PTP600-Collocation que me envía el servicio técnico de Cambium Networks, imitando una posible red que aparece en él.</i>	08/04/2014	09/04/2014
Tercera reunión <i>Seguimiento del TFG</i>	10/04/2014	10/04/2014
Contacto con Cambium Networks <i>Se vuelve a contactar con el servicio técnico de Cambium Networks para solicitar más información sobre la opción PTP-SYNC tras detectar algunas incongruencias en las pruebas realizadas hasta el momento</i>	13/04/2014	13/04/2014
Contacto con Cambium Networks (España) <i>Se hace una misma solicitud también al soporte técnico de España de Cambium Networks.</i>	13/04/2014	13/04/2014
Respuesta del servicio técnico de Cambium Networks (España) <i>Se consigue una reunión vía Skype para que el responsable del servicio técnico de Cambium Networks me explique el funcionamiento de la opción PTP-SYNC. Tras varias evasivas, no vuelvo a conseguir contactar con él.</i>	22/04/2014	22/04/2014
Continuación de pruebas y búsqueda de posibles soluciones	12/05/2014	18/05/2014
Cuarta reunión <i>Seguimiento del TFG y cambio de estrategia para la reducción de interferencias. Se deja de lado la opción PTP-SYNC y se decide aplicar canalización en frecuencia y uso de polarizaciones ortogonales.</i>	22/05/2014	22/05/2014

Pruebas con canalización en frecuencia y polarización	26/05/2014	12/06/2014
Realización de un nuevo diseño	26/05/2014	26/05/2014
Representaciones gráficas en Matlab <i>Obtención de gráficas mediante scripts de Matlab que capturen directamente los datos de todos los documentos Excel generados con todos los resultados que se van obteniendo.</i>	26/05/2014	04/06/2014
Obtención de datos (1) <i>Throughput y disponibilidad en función de la distancia para un sistema en ausencia de interferencias (para todas las posibles modulaciones y anchos de banda)</i>	26/05/2014	27/05/2014
Obtención de datos (2) <i>Throughput y disponibilidad en función de la distancia para un sistema afectado por interferencias en el mismo canal de frecuencia (para todas las modulaciones y anchos de banda)</i>	28/05/2014	29/05/2014
Obtención de datos (3) <i>Throughput y disponibilidad en función de la distancia para un sistema afectado por interferencias en el primer canal adyacente (para QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM y todos anchos de banda posibles)</i>	02/06/2014	02/06/2014
Obtención de datos (4) <i>Throughput y disponibilidad en función de la distancia para un sistema afectado por interferencias en el segundo canal adyacente (para QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM y todos anchos de banda posibles)</i>	03/06/2014	03/06/2014
Obtención de datos (5) <i>Throughput y disponibilidad en función de la distancia para un sistema afectado por interferencias en el tercer canal adyacente (para QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM y todos anchos de banda posibles)</i>	04/06/2014	04/06/2014
Quinta reunión <i>Reunión telefónica</i>	05/06/2014	04/06/2014
Obtención de datos (6) <i>Throughput y disponibilidad en función de la distancia para un sistema afectado por interferencias para distintos canales (para QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM) y todos los anchos de banda posibles, teniendo en cuenta el factor de roll-off.</i>	05/06/2014	05/06/2014
Obtención de datos (7) <i>Throughput y disponibilidad en función de la distancia para un sistema afectado por interferencias para distintas polarizaciones HH, VH, HV y xH (para todas las modulaciones y anchos de banda posibles)</i>	06/06/2014	06/06/2014
Obtención de datos (8) <i>Throughput y disponibilidad en función de la distancia para un sistema afectado por interferencias para las polarizaciones VH y HV, y las modulaciones 64QAM y 256QAM para conseguir mejoras por canalización y polarización cruzada</i>	09/06/2014	09/06/2014
Realizar ajustes en las gráficas generadas <i>Ajustes realizados para obtener unas representaciones más precisas</i>	11/06/2014	12/06/2014
Redacción de la memoria del TFG	13/06/2014	17/06/2014
Planificar inicial <i>Hacer una previsión de la extensión aproximada que debe tener cada uno de los capítulos y secciones de la memoria</i>	13/06/2014	13/06/2014
Redacción del resumen inicial <i>Se redacta el resume inicial de la memoria del TFG en los tres idiomas indicados (castellano, valenciano e inglés)</i>	13/06/2014	13/06/2014
Redacción de la introducción <i>Capítulo 1 de la memoria del TFG</i>	13/06/2014	13/06/2014

Redacción de los objetivos <i>Capítulo 2 de la memoria del TFG</i>	13/06/2014	13/06/2014
Redacción del desarrollo y resultados <i>Capítulo 4 de la memoria del TFG hasta completar el punto 4.2</i>	14/06/2014	14/06/2014
Sexta reunión <i>Reunión telefónica</i>	16/06/2014	16/06/2014
Redacción del desarrollo y resultados <i>Capítulo 4 de la memoria del TFG. Punto 4.3 y 4.4</i>	16/06/2014	17/06/2014
Redacción de la gestión del proyecto <i>Sección del Capítulo 2 de la memoria del TFG</i>	17/06/2014	17/06/2014
Diseño Real	18/06/2014	24/06/2014
Localización de un lugar óptimo para el diseño <i>Se decide finalmente hacerlo entre cuatro pueblos de la provincia de Ciudad Real (Villarta de San Juan, Arenas de San Juan, Villarrubia de los Ojos y Las Labores)</i>	18/06/2014	18/06/2014
Comienzo con la obtención de resultados <i>Ejecución del diseño en el simulador y medida de los primeros datos</i>	18/06/2014	18/06/2014
Estudio de las interferencias <i>Observación de cómo afectan las interferencias al sistema diseñado, siendo necesaria la aplicación de técnicas de reducción de interferencias</i>	19/06/2014	19/06/2014
Aplicación de técnicas de reducción de interferencias <i>Resultados con la aplicación de polarizaciones cruzadas, y seguidamente por canalización en frecuencia</i>	23/06/2014	24/06/2014
Redacción del pliego de condiciones <i>Capítulo 5 de la memoria del TFG</i>	23/06/2014	24/06/2014
Conclusiones y propuesta de trabajo futuro <i>Capítulo 6 de la memoria del TFG</i>	24/06/2014	24/06/2014
Bibliografía <i>Añadir todas las referencias bibliográficas consultadas para la redacción del TFG (Capítulo 7 de la memoria del TFG)</i>	24/06/2014	24/06/2014
Anexos <i>Añadir como anexos los catálogos de los equipos utilizados en el diseño real (Capítulo 8 de la memoria del TFG)</i>	24/06/2014	24/06/2014
Elaboración de la presentación en <i>Power Point</i>	25/06/2014	26/06/2014

3.3 Diagrama temporal



Capítulo 4. Desarrollo y resultados

4.1 Introducción

4.1.1 Metodología de trabajo

En el presente capítulo se va a realizar un estudio previo al diseño de una red punto a multipunto real para conocer cómo varían determinadas características de un radioenlace, como son la disponibilidad o *throughput* de éste, para distintos tipos de modulaciones y anchos de banda posibles. En un primer momento se analizará para el caso ideal en el que no hay interferencias próximas al enlace radio a estudiar, y una vez realizado este estudio se continuará para el caso de existir interferencias próximas, pudiendo comparar ambas representaciones entre sí. Por último, cuando se haya observado para qué modulaciones y anchos de banda en concreto tienen un efecto más perjudicial, se intentará atenuarlas al máximo posible mediante técnicas adecuadas centradas principalmente en polarizaciones cruzadas y canalización en frecuencia.

4.1.2 Especificaciones de la red de estudio



Figura 4.1 - Red para el caso de estudio

Para el proceso de estudio que se llevará a cabo, tal y como se ha comentado en el punto anterior, se realizará un diseño de red mediante el software *LinkPlanner* que permitirá analizar los valores de disponibilidad y *throughput* en función de la distancia.

Esta red se muestra en la figura 4.1, donde se observa un transmisor situado en la ciudad de Valencia, y numerosos receptores situados a distintas distancias comprendidas aproximadamente entre los 200 metros y los 15 kilómetros. En la figura 4.2 también se muestra el diseño de la red con una representación 3D en *Google Earth*. Además, en la tabla 4.1 se incluyen las coordenadas exactas de cada estación base y la distancia a la que está situado cada receptor del transmisor.

Es importante destacar en este punto que a pesar de que todos estos radioenlaces estén superpuestos, y por lo tanto deberían interferirse entre ellos, *LinkPlanner* los interpreta como enlaces independientes que no se ven afectados por otros enlaces próximos a pesar de estar generados dentro de un mismo proyecto.



Figura 4.2 - Representación 3D de la red en Google Earth

	Latitud	Longitud	Distancia		Latitud	Longitud	Distancia
TX	39.46850 N	0.37897 O	0 m.	19a	39.50863 N	0.41115 O	5246 m.
1	39.47060 N	0.38072 O	277 m.	19b	39.51260 N	0.41435 O	5765 m.
2	39.47270 N	0.38246 O	555 m.	20	39.51637 N	0.41755 O	6266 m.
3	39.47480 N	0.38417 O	830 m.	21	39.52007 N	0.42075 O	6761 m.
4	39.47678 N	0.38569 O	1086 m.	22	39.52381 N	0.42395 O	7258 m.
5	39.47900 N	0.38740 O	1373 m.	23	39.52755 N	0.42715 O	7756 m.
6	39.48109 N	0.38910 O	1647 m.	24	39.53128 N	0.43035 O	8254 m.
7	39.48319 N	0.39075 O	1920 m.	25	39.53502 N	0.43355 O	8751 m.
8	39.48529 N	0.39240 O	2193 m.	26	39.53876 N	0.43675 O	9249 m.
9	39.48739 N	0.39420 O	2473 m.	27	39.54250 N	0.43995 O	9747 m.
10	39.48949 N	0.39580 O	2744 m.	28	39.54623 N	0.44315 O	10245 m.
11	39.49159 N	0.39750 O	3019 m.	29	39.54997 N	0.44635 O	10742 m.
12	39.49369 N	0.39913 O	3291 m.	30	39.55371 N	0.44955 O	11240 m.
13	39.49579 N	0.40085 O	3567 m.	31	39.55744 N	0.45275 O	11738 m.
14	39.49789 N	0.40255 O	3842 m.	32	39.56118 N	0.45595 O	12236 m.
15	39.49999 N	0.40425 O	4118 m.	33	39.56492 N	0.45915 O	12733 m.
16	39.50208 N	0.40590 O	4390 m.	34	39.56866 N	0.46235 O	13231 m.
17	39.50418 N	0.40760 O	4665 m.	35	39.57239 N	0.46555 O	13729 m.
18	39.50628 N	0.40930 O	4940 m.	36	39.57613 N	0.46875 O	14226 m.

Tabla 4.1 - Posición del transmisor y los receptores, y distancia entre ellos

También es importante indicar las características que se fijarán en cada uno de los equipos. Todas ellas, mostradas en la figura 4.3, se irán cambiando a medida que se vayan necesitando, y serán:

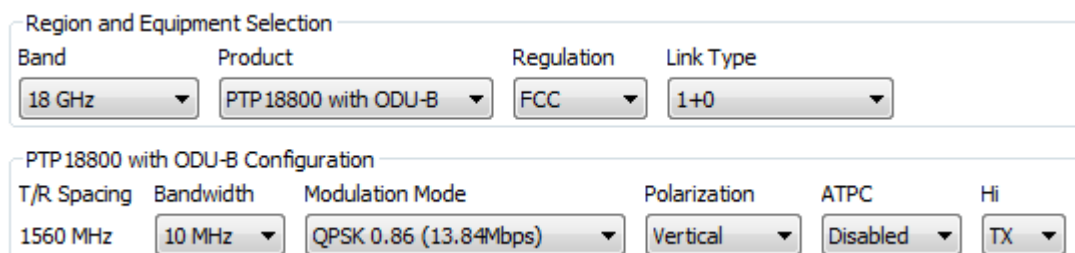


Figura 4.3 - Características de los equipos

- **Band:** En este desplegable se especificará la banda de frecuencias de trabajo del radioenlace. Para el caso de estudio que se está analizando se fijará a 18 GHz.
- **Product:** Se trata del equipo de la empresa *Cambium Networks* que será seleccionado para instalar en cada estación base. Debe ser un equipo acorde a la banda de frecuencias seleccionada en el punto anterior. Para este caso de estudio se seleccionará el equipo *PTP 18800 with ODU-B*.

- **Regulation:** Permite seleccionar la regulación que se aplica en la región en la que el enlace está localizado. Para este caso de estudio se seleccionará FCC (*Federal Communications Commission*)
- **Link Type:** Con este menú puede fijarse el tipo de enlace que se va a diseñar, ya sea un enlace básico, basado en diversidad espacial, diversidad frecuencial, etc... Para este caso de estudio se seleccionará 1+0 (caso básico)
- **T/R Spacing:** En el caso de estar activo se consigue establecer la separación entre los canales de frecuencia en transmisión y recepción. Para este caso de estudio no es modificable, y por lo tanto fijo a 1560 MHz.
- **Bandwidth:** Útil fijar el ancho de banda a utilizar. Éste será un desplegable del que se hará mucho uso durante todas las pruebas realizadas en el presente trabajo.
- **Modulation Mode:** Permite fijar la modulación a la que se va a querer trabajar. También es posible seleccionar la opción '*Adaptive*' para que el equipo ajuste automáticamente la modulación óptima en cada caso. Éste también será un desplegable que se utilizará frecuentemente durante todas las pruebas a realizar, fijando modulaciones concretas.
- **Polarization:** Podrá fijarse la polarización de trabajo entre vertical u horizontal. Esta opción se utilizará cuando se realicen pruebas con distintas polarizaciones. Se comenzará con una polarización vertical.
- **ATPC:** Activando esta opción se habilitará el control automático de potencia transmitida (*Automatic Transmit Power Control*), que se encargará de ajustar la potencia de salida del transmisor en función del nivel de señal que se reciba. Para este caso de estudio lo mantendremos deshabilitado.
- **Hi:** Este desplegable simplemente permitirá indicar cuál de los dos extremos tendrá acceso al rango de frecuencias más altas. El otro extremo por lo tanto tendrá acceso a las frecuencias más bajas. Para este caso de estudio se seleccionará siempre el extremo transmisor (TX).

Finalmente para finalizar con este apartado es necesario incluir las características de las antenas a utilizar, según lo mostrado en la figura 4.4.

Para este diseño se ha decidido hacer uso la antena *HPLP1-18* del fabricante *RadioWaves Inc.*, con una ganancia máxima de 34,2 dB. El resto de características pueden ser consultadas en el anexo I. Es importante comentar también que la potencia de transmisión debe ser fijada por igual para todos los radioenlaces a simular, para así disponer de datos que puedan ser contrastados. Para este caso de estudio se fijará una potencia de transmisión de 3 dBm por ser la máxima posible para el radioenlace de menor distancia.

TX

RadioWaves Inc. 1ft Parabolic HPLP1-18 (34.2dBi) ▼

Antenna Height : meters (Max height at site is 83.0 m)

Maximum EIRP : 37.2 dBm User limit

Maximum Power : 3.0 dBm User limit dBm

Tx Frequency : 19300.000 MHz

Tx Capacity Limit : ▼

Interference :

Figura 4.4 - Características de las antenas

Por último puede observarse también que es posible especificar el canal de frecuencia en transmisión y recepción (*Tx/Rx Frequency*), así como también introducir manualmente el nivel de interferencias que afectan a este radioenlace.

4.1.3 Cálculo de interferencias

Una vez se haya realizado el estudio para todas las modulaciones y anchos de banda en todos los enlaces en ausencia de interferencias, será necesario hacerlo para el caso en el que las interferencias comienzan a actuar. Debido a que el simulador no es capaz de interpretar las interferencias que se producen entre dos radioenlaces próximos entre sí, será necesario que estas sean calculadas de forma independiente e introducidas manualmente para cada uno de ellos. La forma de hacerlo será como la incluida en la expresión (4.1)

$$\text{Interferencia (dBm)} = \text{NLPS (dB)} + P_{Rx}(\text{dBm}) \quad (4.1)$$

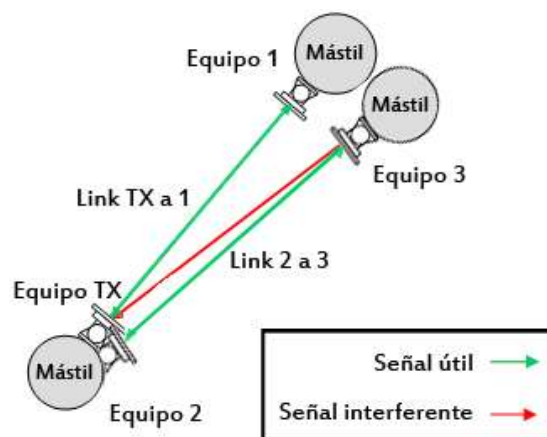


Figura 4.5 - Diseño con señal interferente

Se van a suponer unas interferencias que afectan al enlace útil formando un ángulo de 5°, ya que es aquí donde la antena de *RadioWaves Inc.* seleccionada posee un lóbulo secundario con una NLPS de -15,5 dB, actuando ambas señales en polarización vertical. El motivo de sumar en la expresión (4.1) la potencia recibida es porque se supondrá en todo momento que el enlace interferente está a la misma distancia que el enlace útil y el transmisor interferente tiene una potencia de emisión igual a la del transmisor del enlace útil. En definitiva, el diseño quedará como el de la figura 4.5 y las características como las de la tabla 4.2.

Radioenlace útil		Radioenlace interferente	
Banda	18 GHz	Banda	18 GHz
Canal Tx/Rx	19300 MHz / 17740 MHz	Canal Tx/Rx	19300 MHz / 17740 MHz
Equipo	PTP-18800	Equipo	PTP-18800
Antena Tx/Rx	<i>Radiowaves</i> HPLP1-18	Antena Tx/Rx	<i>Radiowaves</i> HPLP1-18
Potencia Tx	3 dBm	Potencia Tx	3 dBm
Polarización	Vertical	Polarización	Vertical
		Ángulo	5 °
		NLPS	-15,5 dB

Tabla 4.2 - Características del diseño con señal interferente

4.2 Comparativa entre modulaciones

Seguidamente, tras fijar para todos los radioenlaces las especificaciones indicadas anteriormente, se comienzan a obtener resultados de disponibilidad y *throughput* en función de la distancia. En este apartado se mostrará una comparativa entre todas las modulaciones cuando se fija un ancho de banda igual para todas ellas. Aparecerán un total de cuatro gráficas por cada ancho de banda, que se corresponderán con las siguientes:

- Disponibilidad en ausencia de interferencias
- *Throughput* en ausencia de interferencias
- Disponibilidad afectada por interferencias
- *Throughput* afectado por interferencias

Comentar también que todos los posibles anchos de banda y modulaciones soportadas, junto con sus ratios de codificación son las que se muestran en la tabla 4.3.

BW=10 MHz	BW=20 MHz	BW=30 MHz	BW=40 MHz	BW=50 MHz	BW=80 MHz
QPSK 0,86	QPSK 0,84	QPSK 0,80	QPSK 0,80	QPSK 0,80	QPSK 0,80
8PSK 0,85	8PSK 0,83	8PSK 0,80	8PSK 0,80	8PSK 0,84	8PSK 0,80
16QAM 0,91	16QAM 0,91	16QAM 0,85	16QAM 0,85	16QAM 0,92	16QAM 0,85
32QAM 0,84	32QAM 0,85	32QAM 0,83	32QAM 0,92	32QAM 0,87	32QAM 0,83
64QAM 0,83	64QAM 0,83	64QAM 0,88	64QAM 0,87	64QAM 0,82	64QAM 0,82
128QAM 0,83	128QAM 0,77	128QAM 0,82	128QAM 0,82	128QAM 0,82	128QAM 0,82
---	256QAM 0,77	256QAM 0,80	256QAM 0,80	256QAM 0,83	256QAM 0,80
---	---	---	---	---	256QAM 0,91

Tabla 4.3 - Posibles modulaciones y ratios de codificación para cada ancho de banda a 18 GHz

4.2.1 Ancho de banda de 10 MHz

Para comenzar se observará la figura 4.6-a, que se corresponde al caso de disponibilidad en ausencia de interferencias, puede apreciarse que prácticamente para cualquiera de las modulaciones posibles ésta está muy próxima al 100%, disminuyendo cada vez de forma más brusca a medida que la modulación se hace menos robusta (es decir, el número de símbolos aumenta).

Seguidamente en la figura 4.6-b se observará que los valores de velocidad de datos que se podrán conseguir se mantendrán prácticamente constantes, siendo cada vez menores a medida que la modulación se hace más robusta. Sin embargo, para la modulación más alta (128QAM), el hecho de hacer uso de únicamente 10 MHz del espectro limitará a que el *throughput* no pueda ser mucho mayor que 50 Mbps, valor que comparado con datos posteriores se notará que no es demasiado elevado.

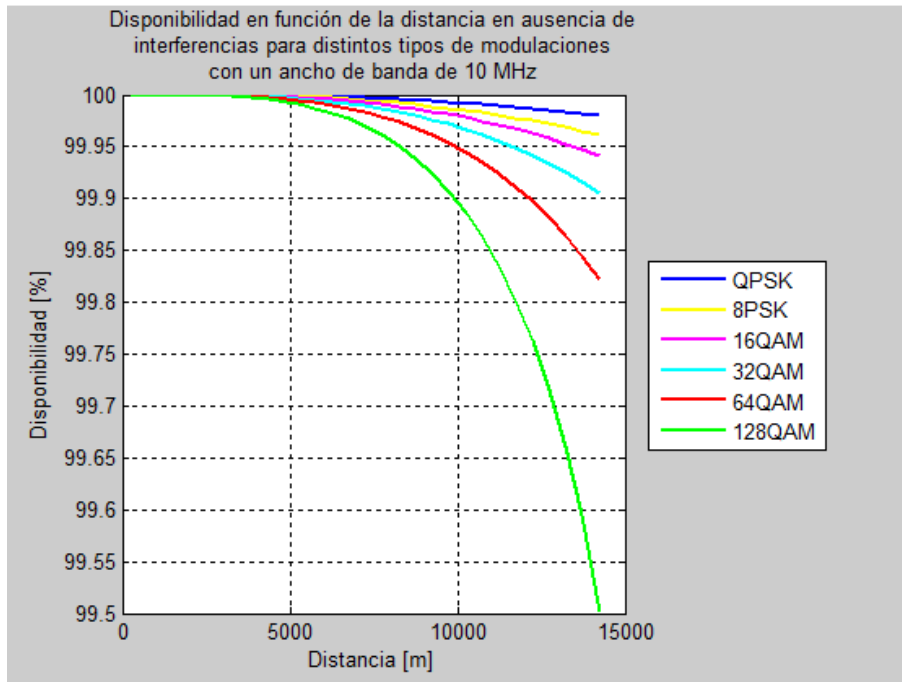


Figura 4.6-a - Disponibilidad para 10 MHz en ausencia de interferencias

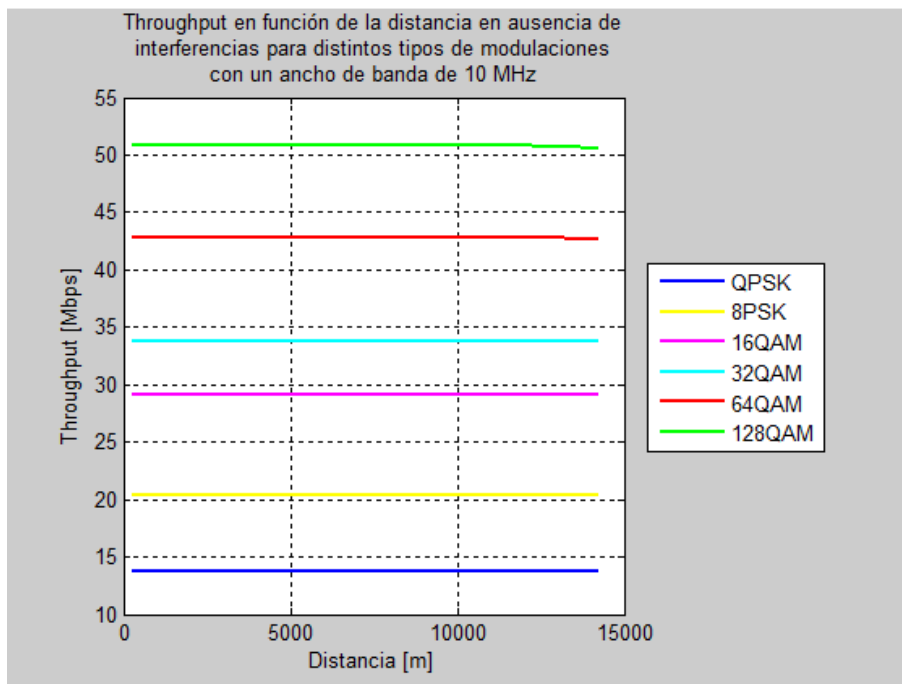


Figura 4.6-b - Throughput para 10 MHz en ausencia de interferencias

Una vez que las interferencias comienzan a actuar puede observarse que el escenario descrito en la parte superior cambia por completo. En la figura 4.7 se verá que para modulaciones poco robustas como 128QAM, 64QAM y 32QAM la disponibilidad del enlace será del 0%, y consecuentemente la transmisión de datos será nula, provocando así que el *throughput* sea de 0 Mbps.

Será necesario recurrir por lo tanto a modulaciones con menor número de símbolos, que a pesar de que limiten las velocidades de transmisión a valores más bajos, al

menos podrán asegurar el funcionamiento del sistema. Para el caso de la modulación 16QAM el valor de disponibilidad llega a ser tan pequeño (en torno al 20%), que el *throughput* que se podrá alcanzar no podrá sobrepasar los 6 Mbps; y por lo tanto no sería una buena opción.

Habría por lo tanto que analizar qué situación sería la óptima entre 8PSK y QPSK. La primera de ellas permitirá alcanzar mayores tasas de transmisión (de poco más de 18 Mbps), pero el hecho de disponer de una disponibilidad de en torno al 90% limitaría el correcto funcionamiento del enlace en algunas ocasiones. Por lo tanto para este caso sería mejor seleccionar la modulación QPSK con la que conseguir un menor valor de *throughput* (en torno a 14 Mbps), pero asegurar una disponibilidad próxima al 100% para cualquier distancia hasta los 15 km.

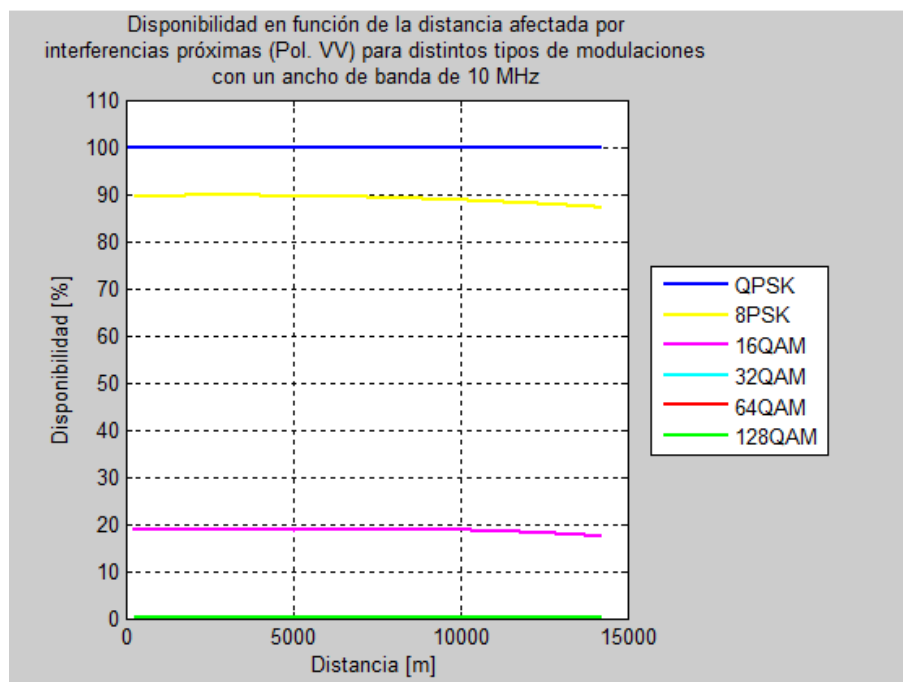


Figura 4.7 - Disponibilidad para 10 MHz afectada por interferencias

4.2.2 Ancho de banda de 40 MHz

De forma similar al caso anterior, se procederá a analizar las mismas representaciones gráficas, pero esta vez para un ancho de banda de 40 MHz.

En la figura 4.8-a puede observarse el efecto, en comparación con la figura 4.6-a vista para un ancho de banda de 10 MHz, de que en este caso la disponibilidad de no todas las modulaciones están próximas al 100% en el rango comprendido hasta los 15 km, como sí ocurría anteriormente, sino que para modulaciones con mayor número de símbolos el valor de disponibilidad cada vez comienza a disminuir de forma más abrupta para distancias más cortas. Es lo que ocurre por ejemplo para una modulación 256QAM, para la cual una vez se sobrepasan aproximadamente los 6 kilómetros el valor de disponibilidad comienza a hacerse menor, llegando a ser cero para una distancia entorno a los 12 kilómetros.

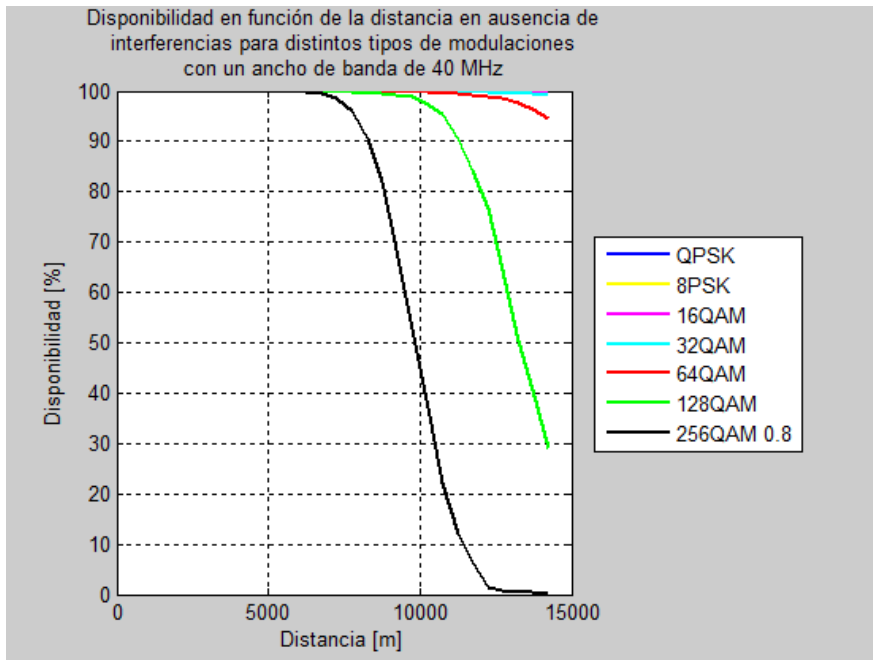


Figura 4.8-a - Disponibilidad para 40 MHz en ausencia de interferencias

Esto afecta consecuentemente en la tasa de transmisión de datos, observándose en la figura 4.8-b que para modulaciones más robustas como QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM y 64QAM se mantiene constante en todo el rango, y además su valor se cuadruplicado con respecto al caso de 10 MHz.

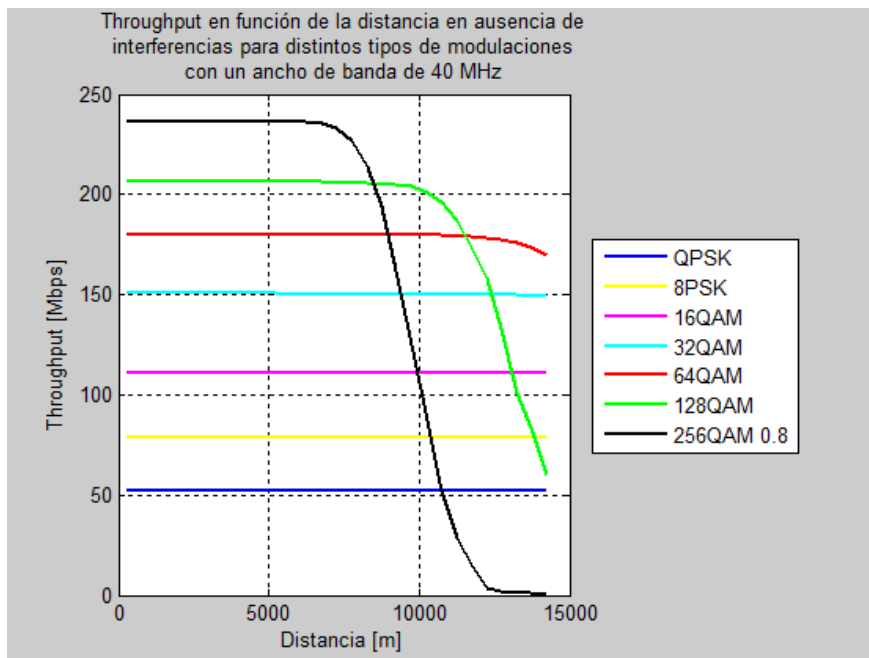


Figura 4.8-b - Throughput para 40 MHz en ausencia de interferencias

Cuando las interferencias vuelven a actuar de nuevo puede verse en la figura 4.9-a un efecto muy similar al que se trataba para 10 MHz, donde modulaciones por encima de 16QAM darán lugar directamente a disponibilidades y tasas de transmisión nulas, por lo que no será adecuado hacer uso de ellas para estos casos.

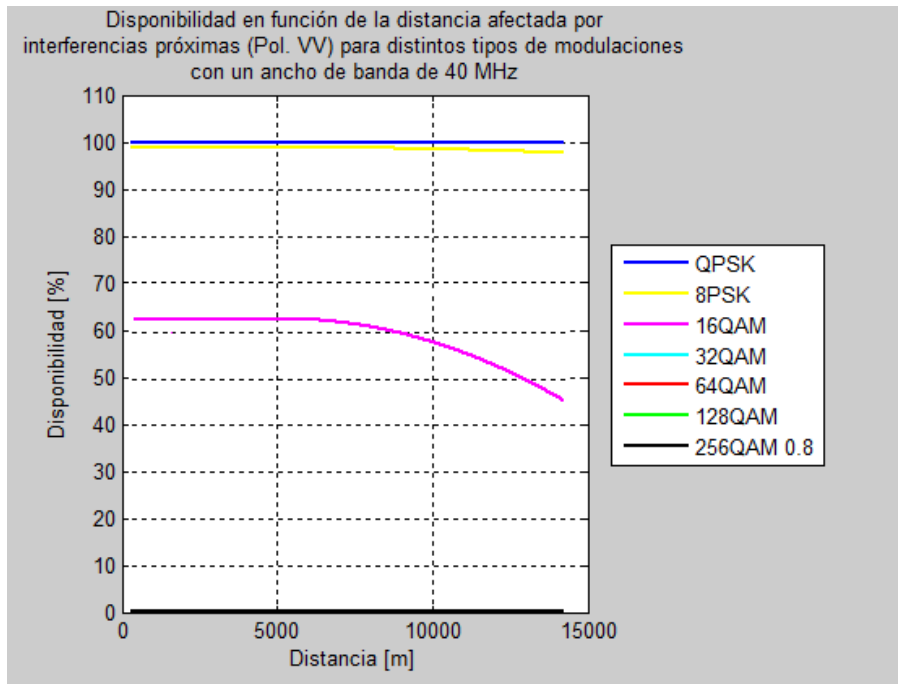


Figura 4.9-a - Disponibilidad para 40 MHz afectada por interferencias

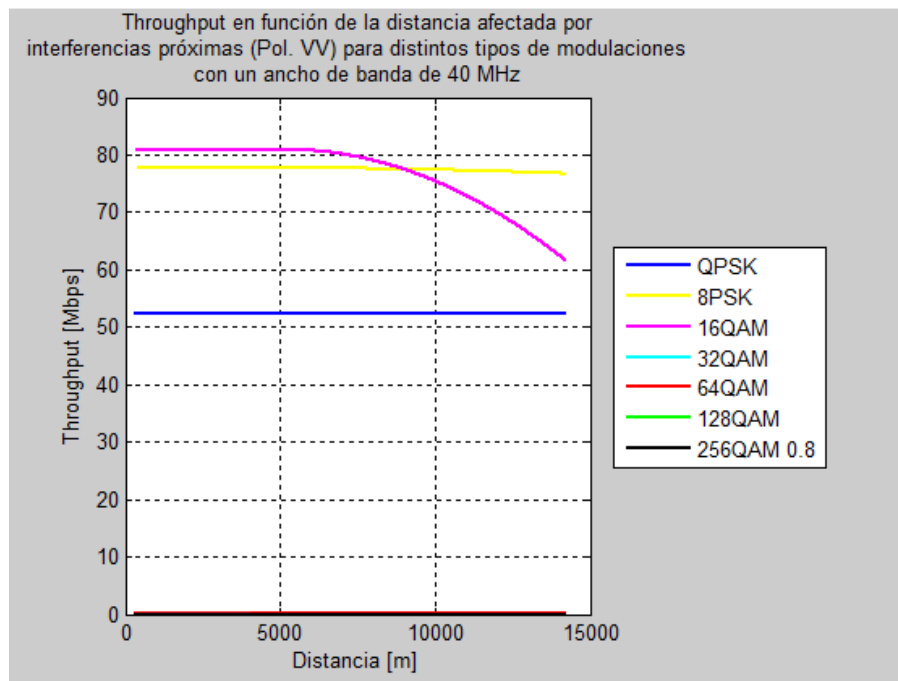


Figura 4.9-b - Throughput para 40 MHz afectado por interferencias

Por otro lado pueden observarse otros aspectos. En este nuevo caso la modulación QPSK proporcionará un 100% de disponibilidad aproximadamente para todas las distancias, con un valor de *throughput* de poco más de 50 Mbps, tal y como aparece reflejado en la figura 4.9-b. No obstante viendo la modulación 8PSK, que igualmente proporcionará una disponibilidad muy parecida, o ligeramente inferior, podrán conseguirse hasta casi 80 Mbps de velocidad de transmisión, lo que quizás la convertiría en la solución óptima para este caso.

Por último, de nuevo la modulación 16QAM a pesar de proporcionar valores de *throughput* por encima de 80 Mbps para distancias hasta los 6 km (figura 4.9-b), el hecho de no llegar a un 70% de disponibilidad del enlace (figura 4.9-a) daría lugar a problemas de funcionamiento en el caso de que ésta fuese escogida.

4.2.3 Ancho de banda de 80 MHz

Para finalizar con la representación de estos resultados acabarán mostrándose los relativos a un ancho de banda de 80 MHz. Como podrá observarse para el caso en el que no afectan las interferencias, representado en la figura 4.10-a, los valores de disponibilidad son muy similares a los que se han visto para el caso de un ancho de banda de 40 MHz, con la única diferencia de decrecer de una forma ligeramente más pronunciada.

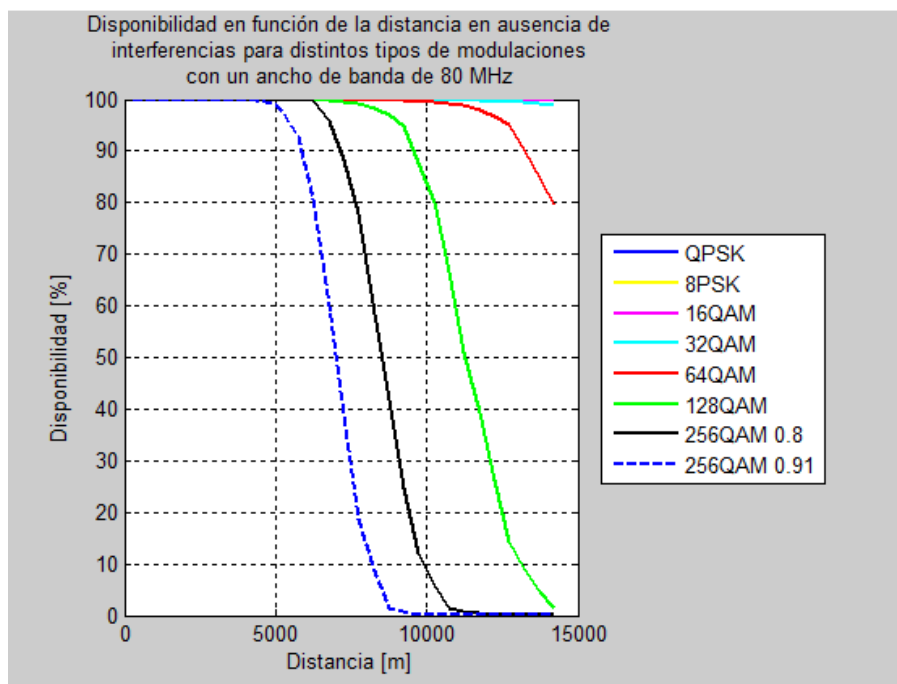


Figura 4.10-a - Disponibilidad para 80 MHz en ausencia de interferencias

Por otro lado los valores de *throughput* que aparecen en la figura 4.10-b siguen también una tendencia muy similar a la observada para el caso de 40 MHz de ancho de banda, pero en esta ocasión de nuevo puede comprobarse como el hacer uso de más porción del espectro conlleva poder transmitir a una mayor tasa de datos que en los casos anteriores.

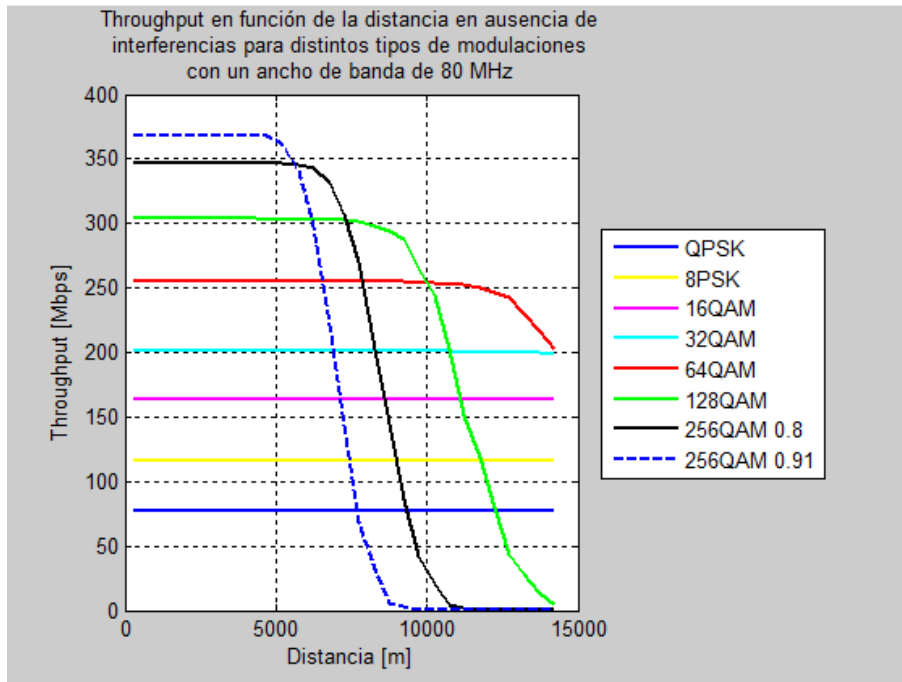


Figura 4.10-b *Throughput para 80 MHz en ausencia de interferencias*

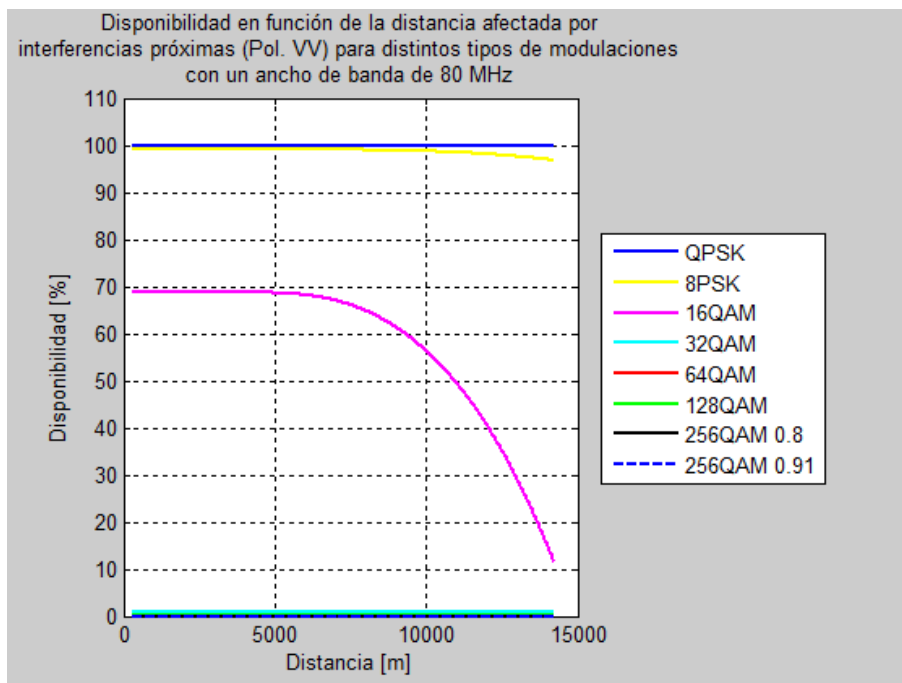


Figura 4.11-a - *Disponibilidad para 80 MHz afectada por interferencias*

Finalmente en las figuras 4.11-a y 4.11-b se observan los cambios ocurridos una vez las interferencias de otro radioenlace próximo que trabaja a una misma frecuencia de trabajo y polarización actúan. De forma similar a lo que se ha comentado en apartados anteriores ocurrirá que para modulaciones más robustas como son QPSK u 8PSK, la aparición de estas interferencias perjudicarán con menos gravedad al sistema, manteniendo los valores de disponibilidad (figura 4.11-a) y *throughput*

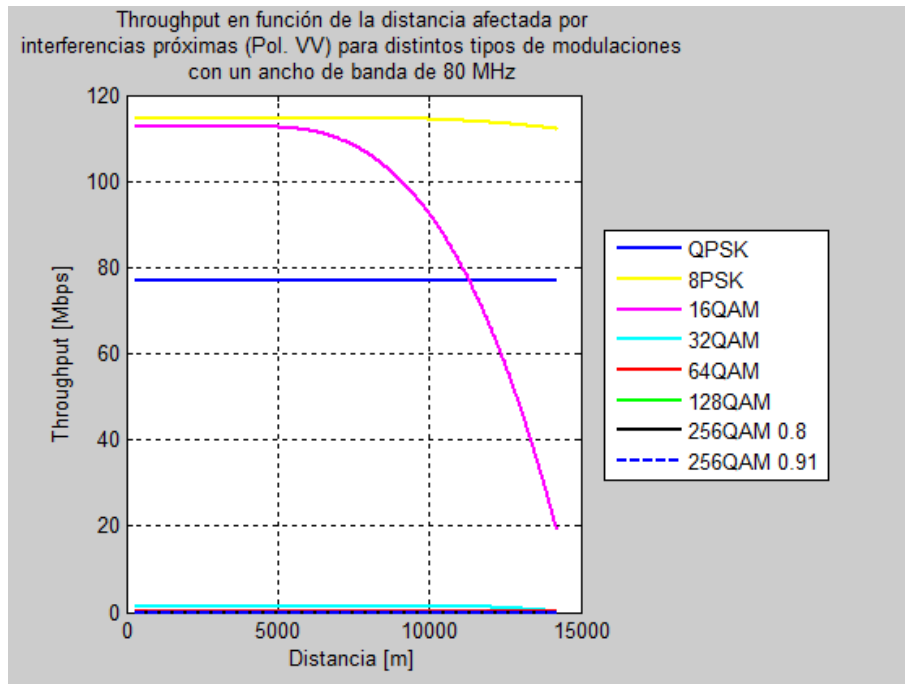


Figura 4.11-b - *Throughput para 80 MHz afectado por interferencias*

(figura 4.11-b) prácticamente iguales a cuando éstas no actúan. No obstante para modulaciones superiores como son 16QAM en adelante el efecto es mucho más perjudicial, y como se verá en secciones posteriores podrá ser atenuado mediante técnicas de canalización en frecuencia, uso de polarizaciones cruzadas o combinación de ambas.

4.3 Comparativa entre anchos de banda

En esta nueva sección se tratará de representar los mismos datos obtenidos en la sección 4.2, pero desde otro punto de vista. En esta ocasión lo que se fijará será una modulación concreta y se observará una comparación entre los posibles anchos de banda para esa modulación. Nuevamente las representaciones a mostrar serán:

- Disponibilidad en ausencia de interferencias
- *Throughput* en ausencia de interferencias
- Disponibilidad afectada por interferencias
- *Throughput* afectado por interferencias

4.3.1 Modulación QPSK

Para el caso de las dos figuras inferiores, 4.12-a y 4.12-b, podrán observarse los valores de disponibilidad y velocidad de datos respectivamente para una modulación QPSK en un entorno ideal donde no existen interferencias. Tal y como se aprecia, los valores de disponibilidad (figura 4.12-a) serán próximos al 100% para cualquier ancho de banda, aunque estos van disminuyendo ligeramente a medida que la distancia va aumentando. Para el caso del *throughput* (figura 4.12-b), los valores que se conseguirán serán constantes hasta una distancia de 15 kilómetros y rondarán entre los 13 Mbps y los 77 Mbps en función del ancho de banda escogido, siendo evidente que a mayor porción del espectro seleccionado, mayor velocidad de transmisión de los datos podrá conseguirse.

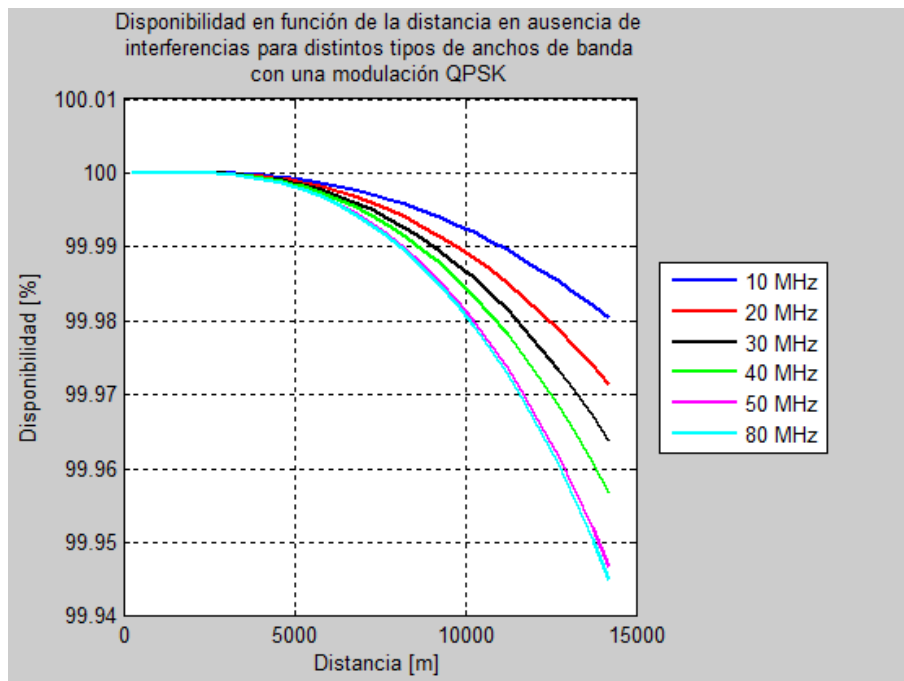


Figura 4.12-a - Disponibilidad para QPSK en ausencia de interferencias

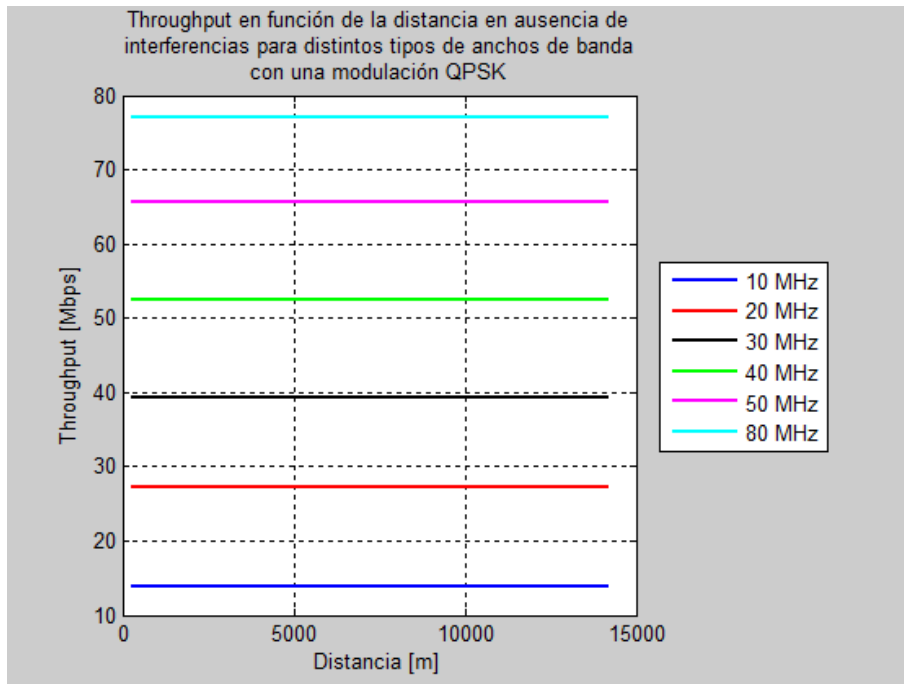


Figura 4.12-b - *Throughput para QPSK en ausencia de interferencias*

Una vez las interferencias pasan a actuar en este sistema, puede observarse en las figura 4.13-a y 4.13-b que los cambios son prácticamente insignificativos respecto al caso anterior. El hecho de ser QPSK la modulación más robusta de todas, asegurará un correcto funcionamiento del sistema a pesar de que una señal interferente actuando a la misma frecuencia y polarización esté presente.

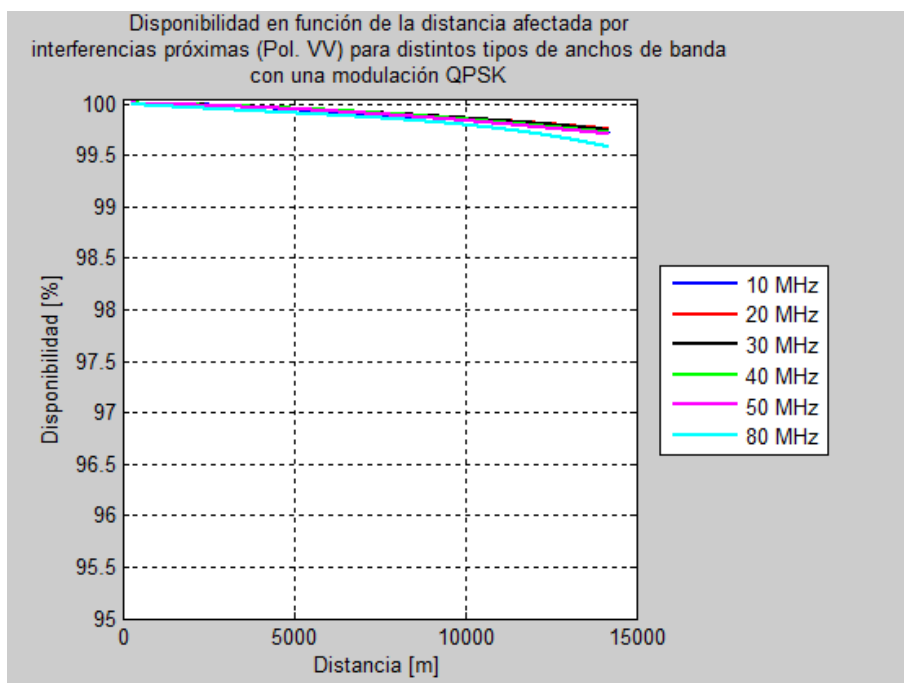


Figura 4.13-a - *Disponibilidad para QPSK afectada por interferencias*

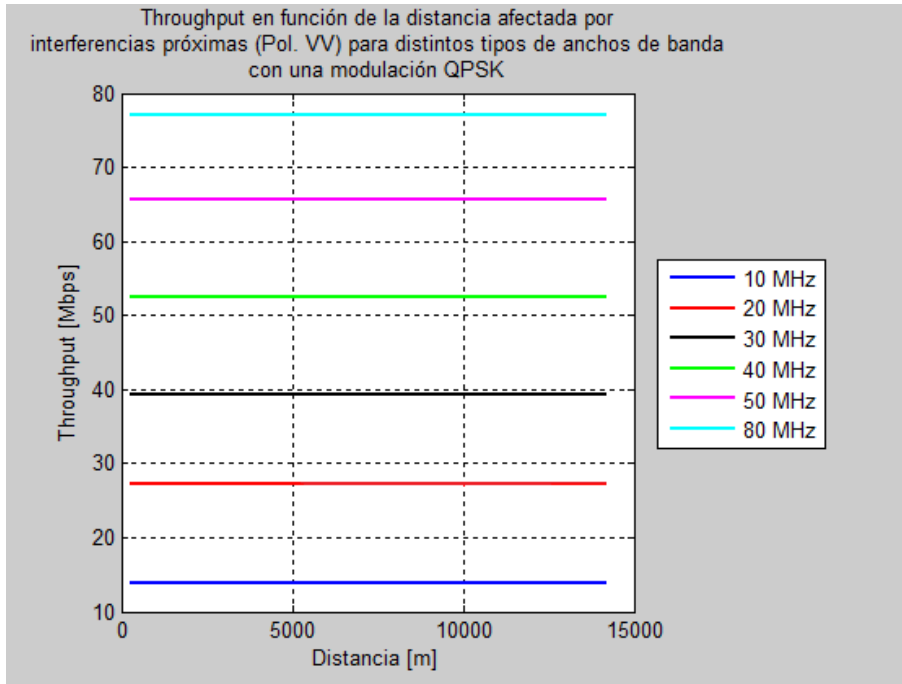


Figura 4.13-b - *Throughput para QPSK afectado por interferencias*

El único inconveniente que surgirá para esta modulación será que las tasas que se podrán conseguir para un determinado ancho de banda serán inferiores a las alcanzables con otras modulaciones con mayor número de símbolos. No obstante en un sistema en el que no se requieran mayores velocidades que las mostradas en la figura 4.13-b será más que suficiente fijar como modulación QPSK.

4.3.2 Modulación 16QAM

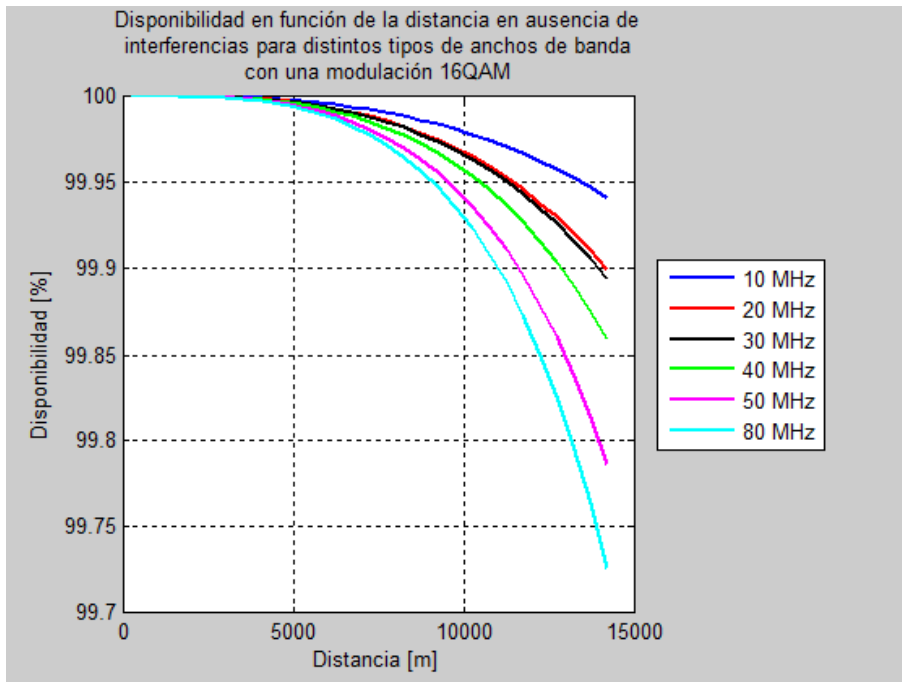


Figura 4.14-a - *Disponibilidad para 16QAM en ausencia de interferencias*

Continuado en esta sección con la modulación 16QAM, podrá apreciarse en la figura 4.14-a que la disponibilidad sigue una tendencia muy similar a la observada en la figura 4.12-a para la modulación QPSK, cuando las interferencias no actúan en el sistema. No obstante sí es destacable que las curvas empiecen a decrecer antes, y para un mismo ancho de banda y distancia en este caso se conseguirá un valor de disponibilidad ligeramente inferior.

Por otro lado, según la figura 4.14-b, los valores de *throughput* también se ve que se mantienen prácticamente constantes a todas las distancias y para todos los anchos de banda. No obstante, por el hecho de hacer uso de una modulación en cuya constelación aparecen mayor número símbolos que para QPSK, las velocidades de transmisión de datos que puedan conseguirse son mucho mayores, siendo superiores a medida que el ancho de banda también lo es. Sin embargo también habrá que tener en cuenta que cuanto mayor sea el ancho de banda, tal y como se ha visto en la sección 4.2 del presente trabajo, los valores de disponibilidad cada vez serán menores y esto hecho puede acabar dando lugar a problemas, aunque para la modulación que ahora se está tratando (16QAM), prácticamente todas están próximas al 100%.

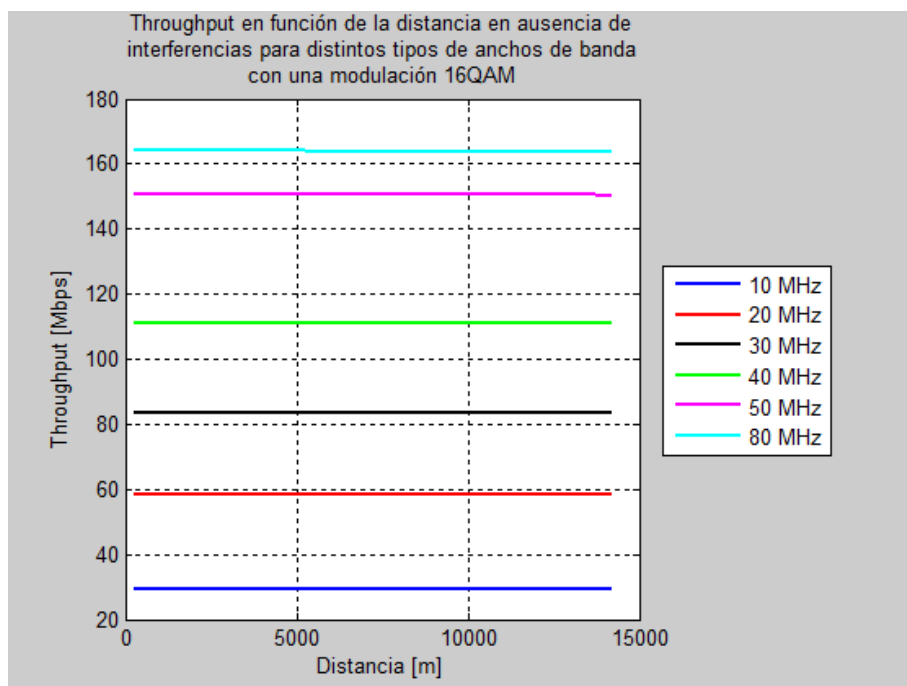


Figura 4.14-b - *Throughput para 16QAM en ausencia de interferencias*

4.3.3 Modulación 64QAM

Cuando aumenta el orden de la modulación se observan cada vez los efectos de forma más pronunciada. Como se muestra en la figura 4.16-a, la disponibilidad para el caso en ausencia de interferencias, disminuirá de forma más pronunciada para radioenlaces más alejados cuanto mayor sea el ancho de banda utilizado, siendo prácticamente del 100% hasta los 15 km sólo para 10 MHz y 20 MHz.

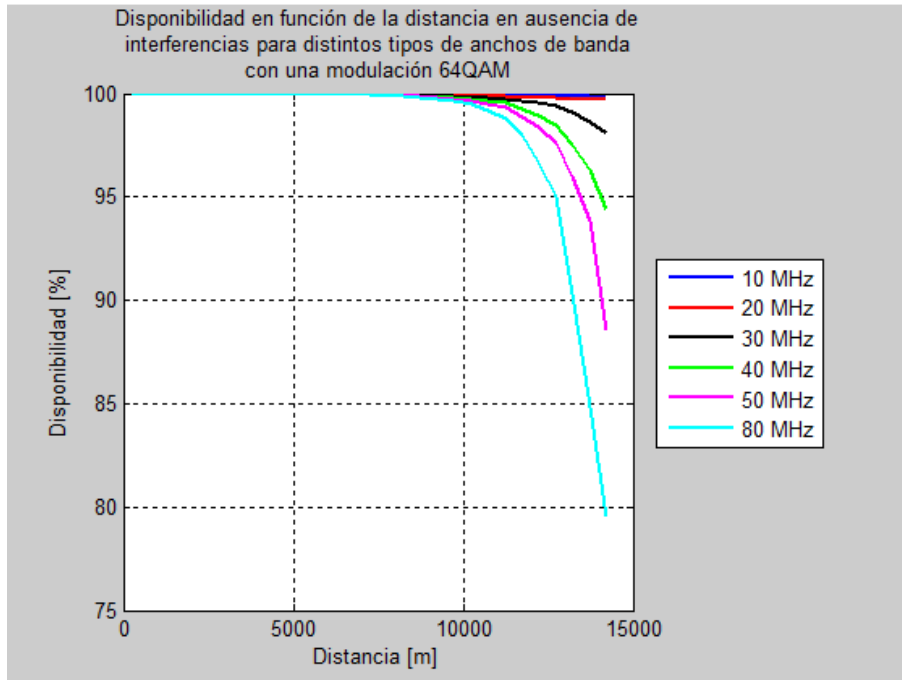


Figura 4.16-a - Disponibilidad para 64QAM en ausencia de interferencias

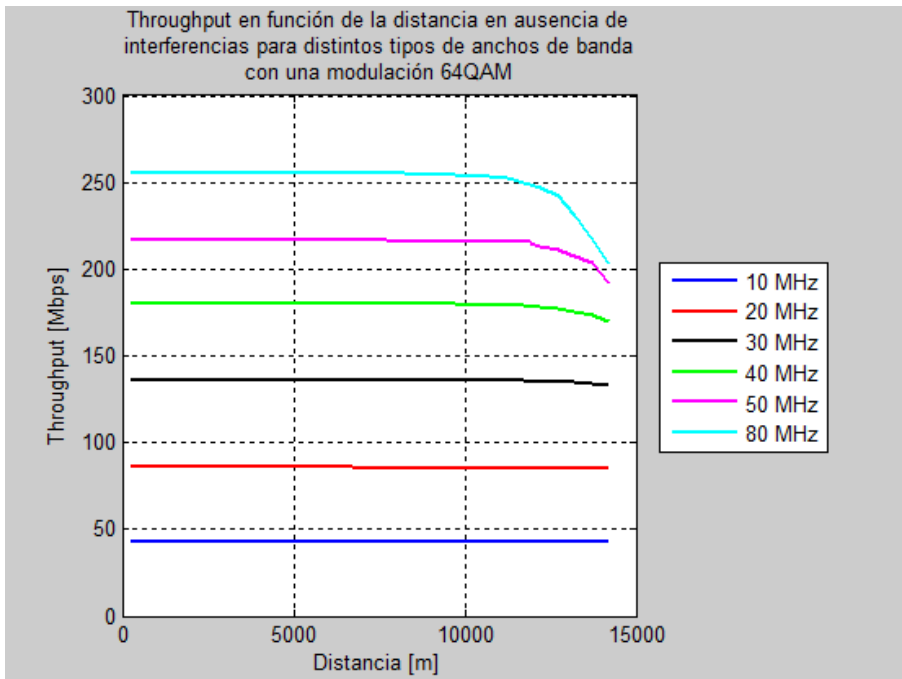


Figura 4.16-b - Throughput para 64QAM en ausencia de interferencias

De forma similar se puede apreciar en la figura 4.16-b que la velocidad de transmisión de los datos será prácticamente constante en todos los casos excepto para los mayores anchos de banda (50 MHz y 80 MHz), que poco a poco empiezan a disminuir para distancias superiores a los 10 kilómetros. También en comparación con la modulación 16QAM vista en la figura 4.14-b, se vuelve a apreciar un aumento de los valores de *throughput* por el hecho de hacer uso de mayor número de símbolos para 64QAM.

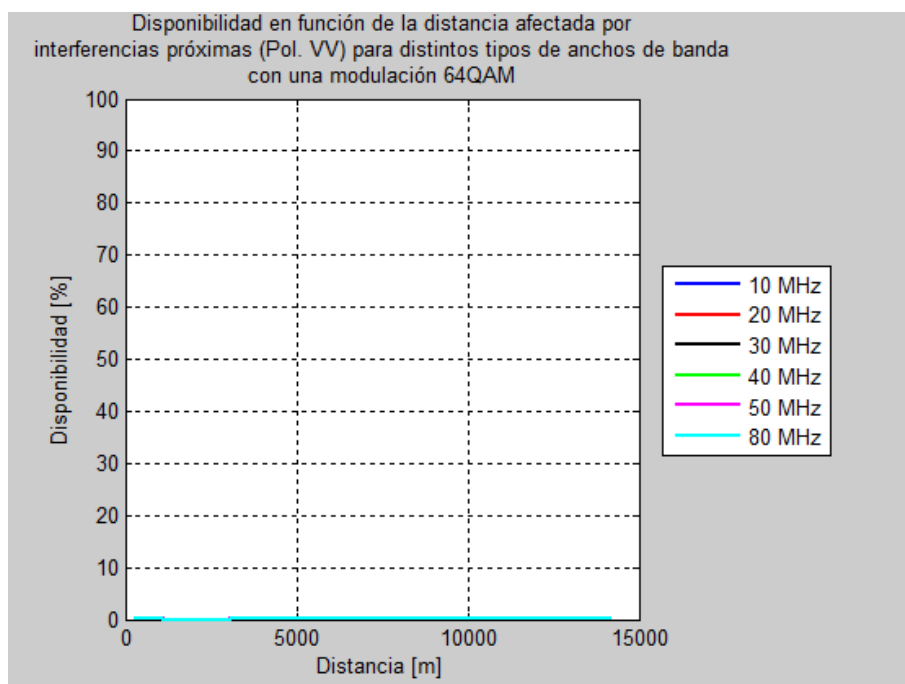


Figura 4.17-a - Disponibilidad para 64QAM afectada por interferencias

¿Y qué ocurre para la modulación 64QAM, siendo esta menos robusta que las vistas en las dos secciones anteriores, cuando una señal interferente comienza a hacer acto de presencia?

Su respuesta puede apreciarse en las figura 4.17-a y 4.17-b, viendo que afectan gravemente al funcionamiento de un sistema que haga uso de esta modulación, puesto que para cualquier ancho de banda escogido la disponibilidad inevitablemente será del 0%, y consecuentemente el *throughput* también será nulo.

Puede concluirse por lo tanto, llegados a este punto, que en el diseño de una red en la que se sea consciente que existen interferencias próximas trabajando a una misma frecuencia y polarización, no será adecuado hacer uso de modulaciones poco robustas como lo son 64QAM en adelante. No obstante, si quisieran utilizarse porque el diseño requiere de elevadas tasas de transmisión, que sólo estas modulaciones las pueden proporcionar, sería inevitablemente necesario hacer uso de técnicas para paliar el efecto de las interferencias.

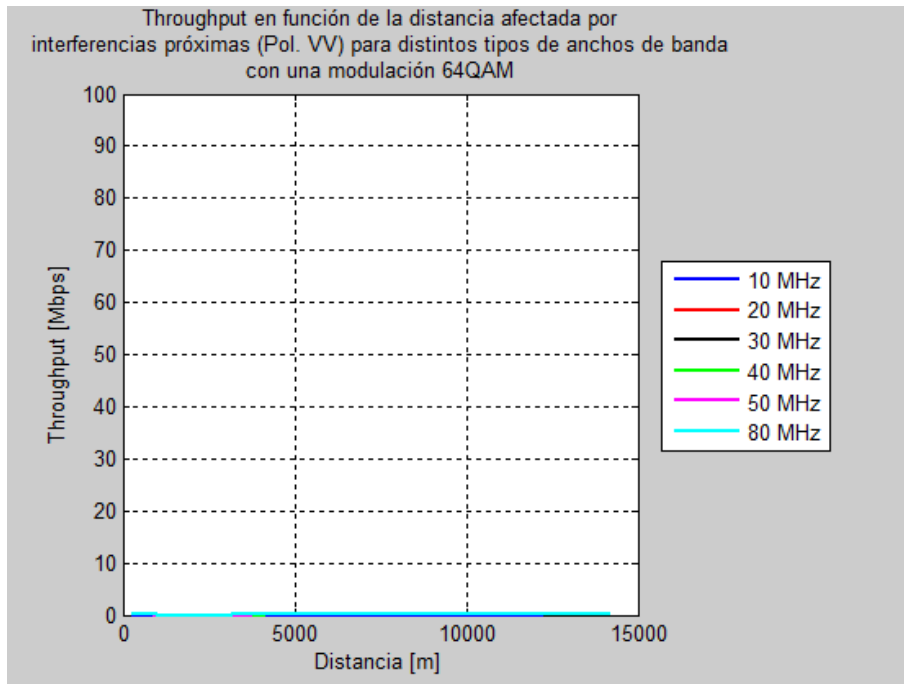


Figura 4.17-b - *Throughput para 64QAM afectado por interferencias*

4.3.4 Modulación 256QAM

Para finalizar con esta parte de resultados se mostrarán a continuación los datos obtenidos para la modulación 256QAM.

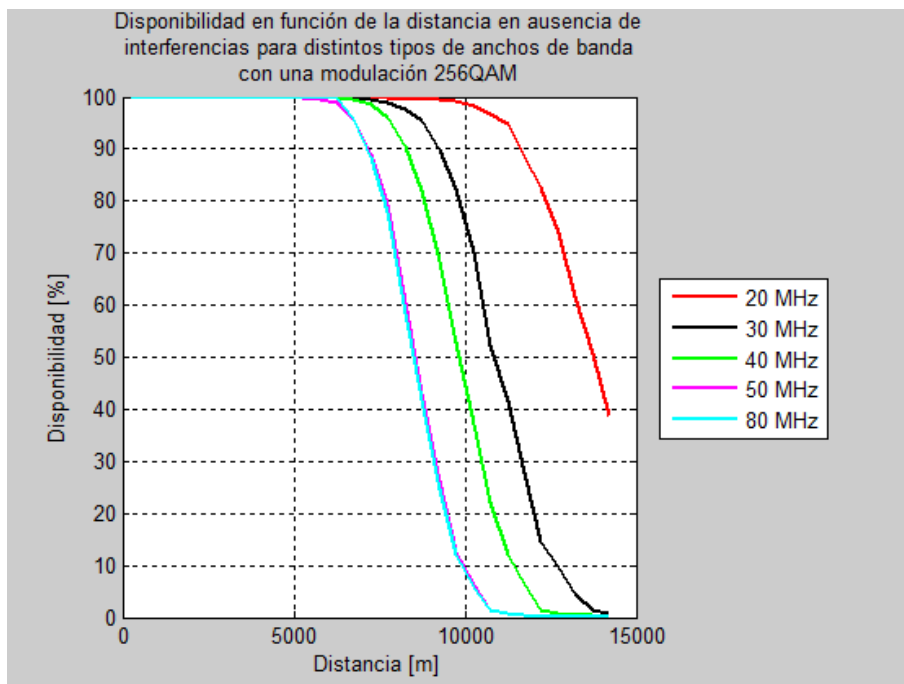


Figura 4.18-a - *Disponibilidad para 256QAM en ausencia de interferencias*

La disponibilidad para el caso en ausencia de interferencias, mostrada en la figura 4.18-a se observa que se ve mucho más afectada por una brusca caída cada vez a menores distancias a medida que el ancho de banda seleccionado sea mayor. Por lo tanto ante la vista de estos resultados se hace evidente que en el caso de necesitar diseñar un radioenlace para distancias superiores a 10 kilómetros aproximadamente, la mejor opción será no hacer uso de la modulación 256QAM, ya que incluso sin que otras señales estén interfiriendo gravemente en la red, de por sí ya no se podrán alcanzar valores de disponibilidad próximos al 100%, y sería necesario recurrir a modulaciones más robustas para poder cumplir dichos requisitos.

De forma similar se observan los resultados de *throughput* en la figura 4.18-b, siendo ya trabajo del encargado del diseño de la red seleccionar el ancho de banda necesario, en el caso de seleccionar la modulación 256QAM, en función de los requisitos de tasa de datos que se vayan a necesitar. Se observa además que para el uso de una frecuencia de trabajo de 18 GHz el máximo valor de *throughput* alcanzable con los equipos utilizados para este estudio será de 350 Mbps en el caso de que se escoja una modulación 256QAM, haciendo uso de un ancho de banda de 80 MHz, con una polarización vertical y en ausencia de interferencias (o en el caso de que existan, sean estas atenuadas mediante las técnicas adecuadas).

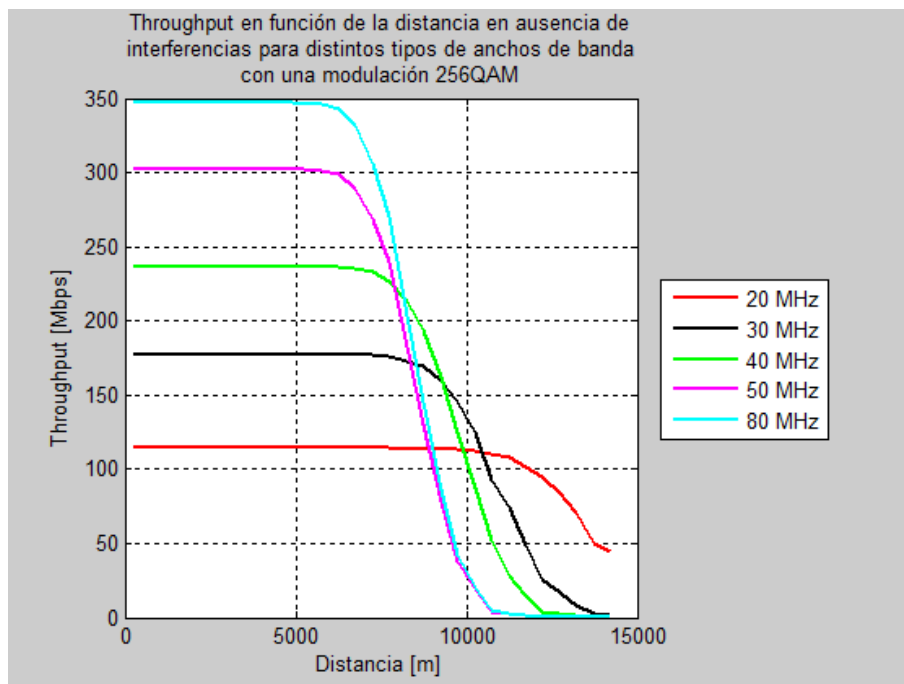


Figura 4.18-b - *Throughput para 256QAM en ausencia de interferencias*

4.4 Resultados mediante la aplicación de técnicas de reducción de interferencias

Las técnicas de reducción de interferencias son métodos de bajo coste que garantizan la calidad de la señal en un sistema, aportando ventajas como son:

- Reducción del porcentaje de tiempo de un desvanecimiento de la señal
- Aumento de la fiabilidad
- Mejora de la señal a ruido (SNR)

Durante las anteriores secciones del presente trabajo se ha podido observar que la aparición de señales interferentes perjudican gravemente el correcto funcionamiento de un radioenlace, especialmente para el caso en el que las modulaciones cada vez hacen uso de mayor número de símbolos en su constelación (modulaciones menos robustas) así como cuando el ancho de banda es cada vez mayor.

Se ha mostrado por lo tanto que se hace necesario hacer uso de técnicas adicionales para que en una arquitectura de radioenlaces fijos punto a punto en los cuales todos sus transmisores están situados en una misma localización, no se interfieran entre sí en el caso de estar trabajando a una misma frecuencia.

En los próximos apartados se mostrarán los resultados obtenidos al aplicar sobre el diseño creado en este capítulo del trabajo dos técnicas distintas, así como también en algunos determinados casos la combinación de ambas:

- Canalización en frecuencia
- Uso de polarizaciones cruzadas

4.4.1 Comparativa aplicando canalización en frecuencia

Tal y como se vio en la figura 4.5, el caso de estudio que se está analizando en el presente trabajo no se concibe como una red punto a multipunto como sistema de distribución de datos, sino como un conjunto de enlaces punto a punto independientes cuyos transmisores están situados muy próximos entre sí, por ejemplo, en un mismo mástil.

Todos los resultados mostrados hasta este momento han supuesto que tanto la señal interferente como la señal útil estaban trabajando en un mismo canal en frecuencia de la banda de 18 GHz. Tal y como se ha comprobado, este hecho condicionaba a que para determinadas modulaciones y anchos de banda se tenía una caída de la disponibilidad y el *throughput*, que en modulaciones como 256QAM o 64QAM provocaban un funcionamiento nulo del sistema.

En los próximos resultados se pretende mostrar cómo el hecho de que la señal interferente esté separada en frecuencia al primer, segundo o tercer canal adyacente de la señal útil se pueden conseguir importantes mejoras que permitirán un correcto funcionamiento del sistema.

Para ello ha sido necesario recalcular el nivel de interferencias que afectan a cada radioenlace, haciendo uso de una nueva ecuación distinta a la 4.1 vista anteriormente.

Selectividad de canal adyacente para distintas modulaciones digitales			
Canal adyacente	QPSK	16QAM	64QAM
Primero	10 dBc	4 dBc	-2 dBc
Segundo	20 dBc	14 dBc	8 dBc
Tercero	30 dBc	24 dBc	18 dBc

Tabla 4.4 - *Selectividad de canal adyacente para distintos tipos de modulaciones*

$$Interferencia (dBm) = NLPS (dB) + P_{Rx} (dBm) + \Delta_{cocalanal} (dB) + \nabla_{frecuencia} (dB) \quad (4.2)$$

$$Interferencia (dBm) = NLPS (dB) + P_{Rx} (dBm) + (Selectividad + Caída)_{canal} \quad (4.3)$$

Aunque muy similar, la expresión a utilizar ahora será la 4.2, que aparte de incluir el nivel lóbulo principal a secundario ($NLPS$) y la potencia recibida (P_{Rx}) como anteriormente, añade además los valores de selectividad del canal adyacente ($\Delta_{cocalanal}$) recogidos en la tabla 4.4, así como la caída en frecuencia de cada canal ($\nabla_{frecuencia}$). La suma de estos dos últimos se ha calculado a partir de las expresiones 4.4 y 4.5, y viene recogida en la tabla 4.5.

$$\Delta = \frac{Selectividad_{tercer_canal}}{3} \quad (4.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (Selectividad + Caída)_{primer_canal} = Selectividad_{primer_canal} + 1 \cdot \Delta \\ (Selectividad + Caída)_{segundo_canal} = Selectividad_{segundo_canal} + 2 \cdot \Delta \\ (Selectividad + Caída)_{tercer_canal} = Selectividad_{tercer_canal} + 3 \cdot \Delta \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

Selectividad de canal adyacente y caída en frecuencia para distintas modulaciones digitales			
Canal adyacente	QPSK	16QAM	64QAM
Primero	20 dBc	12 dBc	4 dBc
Segundo	40 dBc	30 dBc	20 dBc
Tercero	60 dBc	48 dBc	36 dBc

Tabla 4.5 - *Selectividad de canal adyacente y caída en frecuencia para distintos tipos de modulaciones digitales*

Antes de comenzar a mostrar los resultados obtenidos, se destaca la figura 4.19, donde se muestra el por qué es necesario tener en cuenta el factor $\Delta_{cocalanal}$ para el cálculo del nivel de interferencias. Tal y como se puede apreciar, los canales en frecuencia no son ideales, es decir, los canales 17,810 GHz y 17,865 GHz no están completamente aislados uno del otro, sino que tienen un pequeño desvanecimiento que afecta a los canales adyacentes. Por lo tanto, por dicho motivo, el usar dos canales contiguos no es capaz de aislar completamente las interferencias.

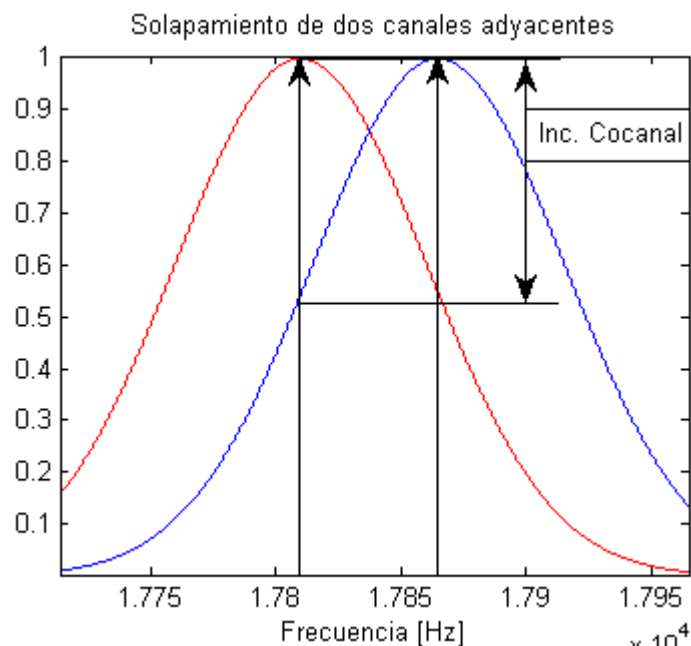


Figura 4.19 - Solapamiento de dos canales adyacentes

4.4.1.1 Resultados

Tras volver a simular el diseño de la red con el software *LinkPlanner*, pero esta vez aplicando canalización en frecuencia con una disminución en el valor de interferencia con los factores mostrados en la tabla 4.5, se han obtenido gran cantidad de resultados, de los cuales se incluirán únicamente casos concretos con los que poder analizar el efecto.

Tal y como puede observarse por ejemplo en la figura 4.20, para una modulación QPSK con un determinado ancho de banda (en este caso de 20 MHz), cuando tanto la señal interferente como la señal útil trabajan en un mismo canal frecuencial, se produce una disminución más acusada que para el caso en el que las interferencias no están presentes (aunque para la distancia más alejada la diferencia de disponibilidad es tan sólo de un 0,22% aproximadamente). Sin embargo el hecho de que ambas señales ya estén separadas tan sólo al primer canal adyacente, ya mejorará las prestaciones igualándolas al caso sin interferencias, con lo que hacer uso del segundo y tercer canal ya no se haría necesario. Por otro lado, los valores de *throughput* para esta modulación prácticamente se verían inalterados por la aparición de las interferencias, y por lo tanto la mejora no será significativa.

Una vez se comienza a aumentar el número de símbolos de la modulación, se observará que las mejoras son mucho más importantes. Por ejemplo también para un ancho de banda de 20 MHz y una modulación 16QAM se puede ver en la figura 4.21 que la disponibilidad para el caso en el que las dos señales trabajan en un mismo canal es en torno al 20-25 %, y únicamente haciendo uso del primer canal adyacente se conseguirá igualar a las prestaciones para el caso en el que las interferencias no afectaban al sistema.

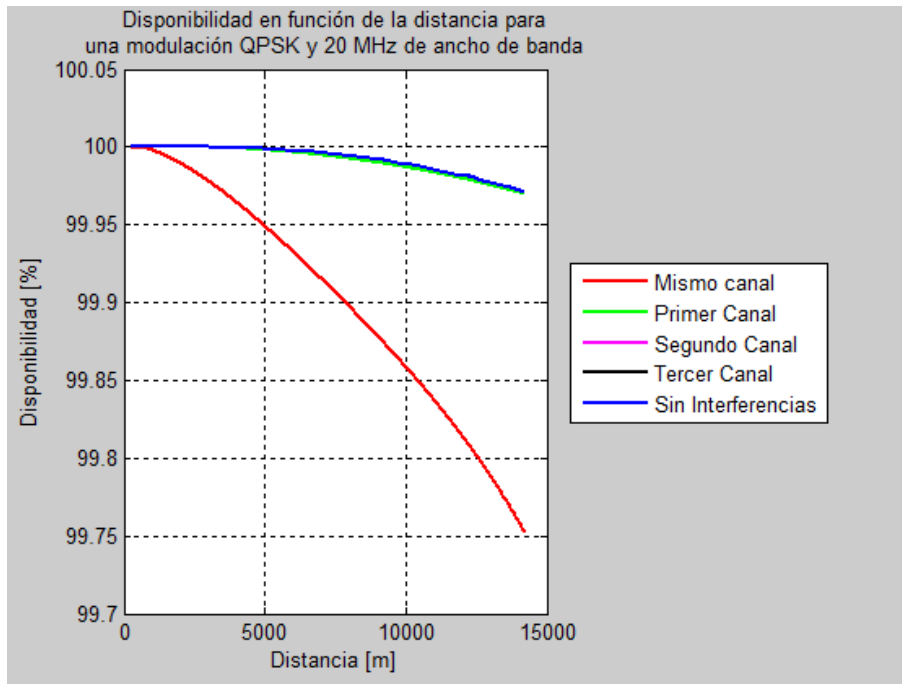


Figura 4.20 - Resultados de disponibilidad para la modulación QPSK y un ancho de banda de 20 MHz aplicando canalización en frecuencia

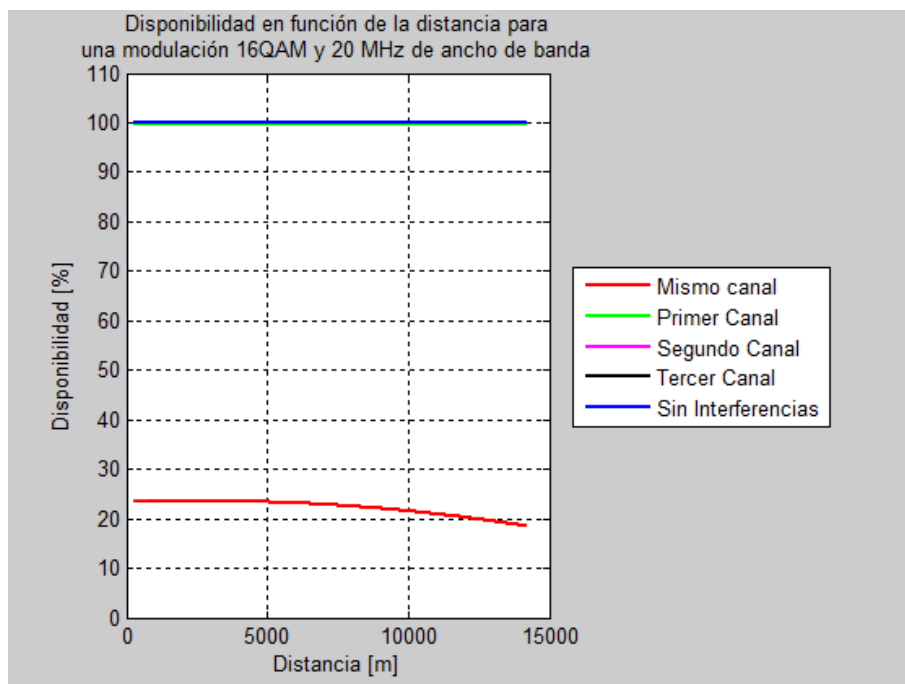


Figura 4.21 - Resultados de disponibilidad para la modulación 16QAM y un ancho de banda de 20 MHz aplicando canalización en frecuencia

Para el caso de tasa de datos para la modulación 16QAM, tal y como se ve en la figura 4.22, ocurre un efecto similar al de la disponibilidad. Ahora se pasará de valores inferiores a 15 Mbps en el caso de utilizar el mismo canal, al valor máximo alcanzable en este caso de 58 Mbps al hacer uso del primer canal adyacente.

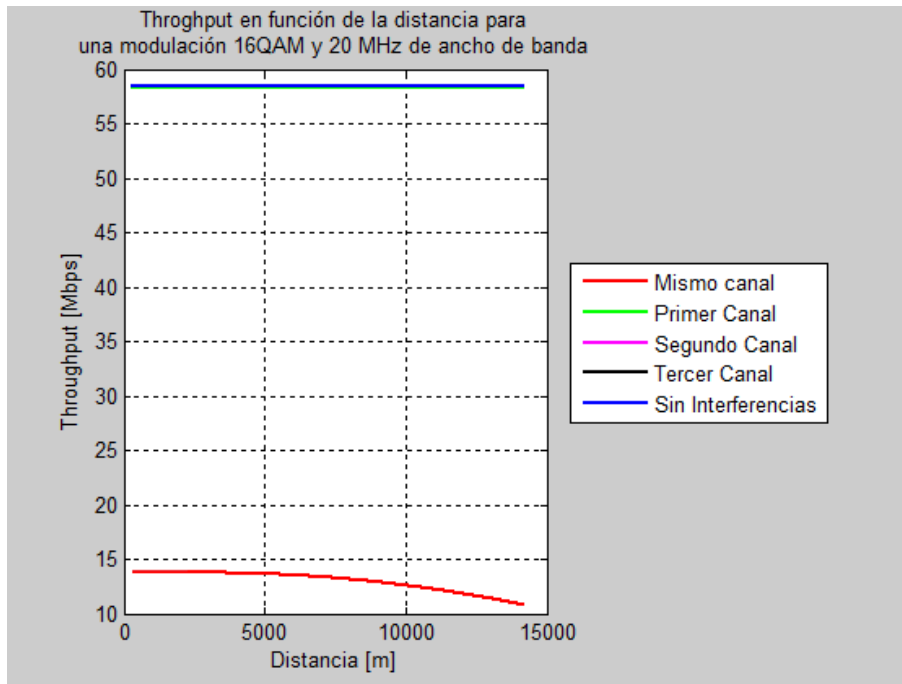


Figura 4.22 - Resultados de throughput para la modulación 16QAM y un ancho de banda de 20 MHz aplicando canalización en frecuencia

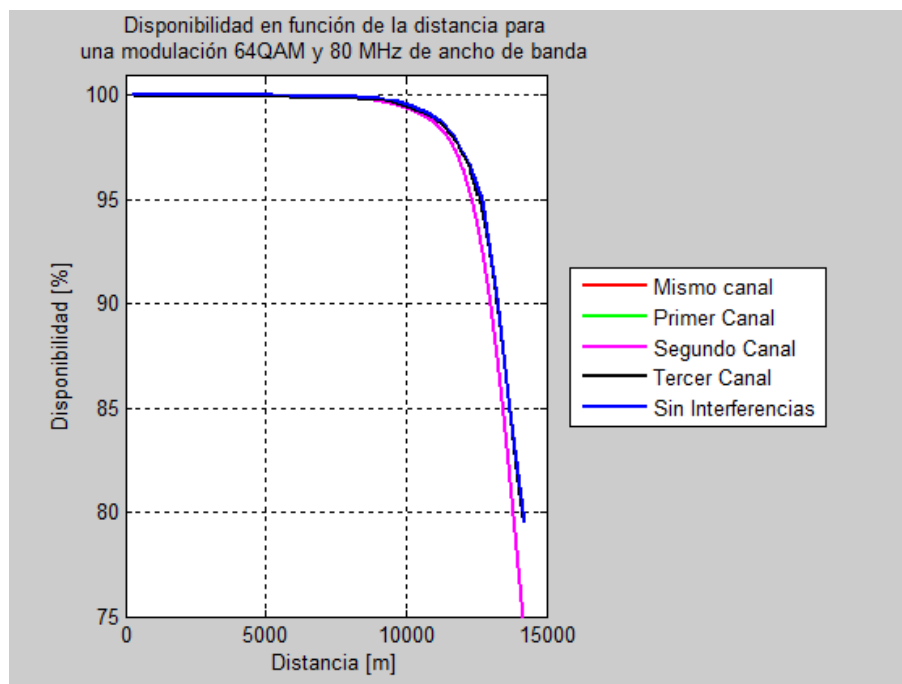


Figura 4.23 - Resultados de disponibilidad para la modulación 64QAM y un ancho de banda de 80 MHz aplicando canalización en frecuencia

Habiendo ahora aumentado de nuevo el orden de la modulación a 64QAM, se verá que para alcanzar la máxima disponibilidad (figura 4.23) o máximo *throughput* (figura 4.24), hacer uso únicamente del primer canal adyacente como hasta ahora había ocurrido ya no será suficiente. Ahora esta separación entre canales seguirá proporcionando disponibilidades y tasas pequeñas, y sólo se alcanzarán los valores

máximos cuando se utilice una separación entre señal útil e interferente de dos canales o más. El uso del tercer canal adyacente mejorará ligeramente las prestaciones, aunque la diferencia es mínima respecto al segundo canal.

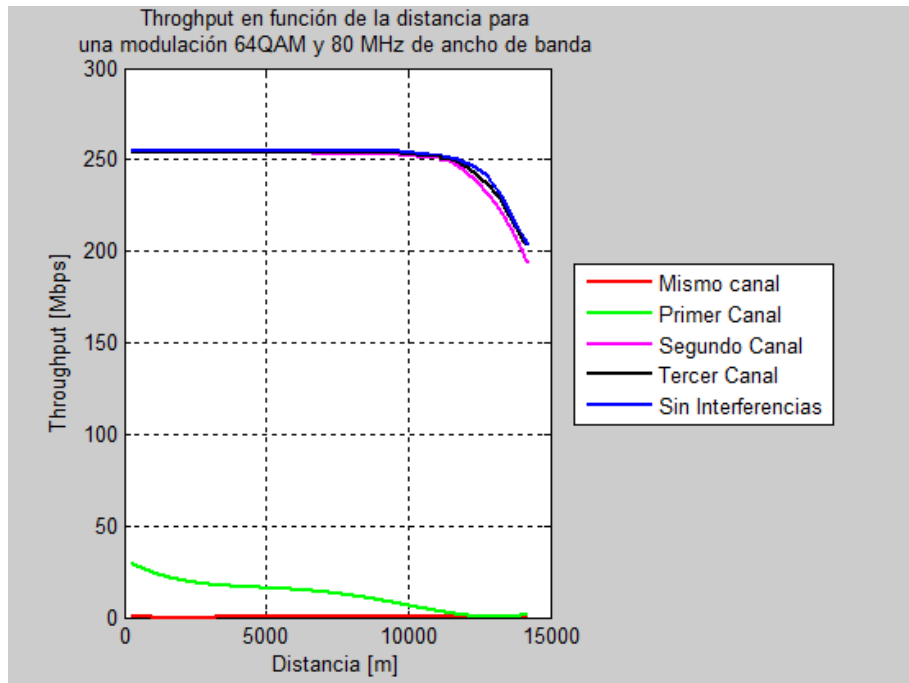


Figura 4.24 - Resultados de throughput para la modulación 64QAM y un ancho de banda de 80 MHz aplicando canalización en frecuencia

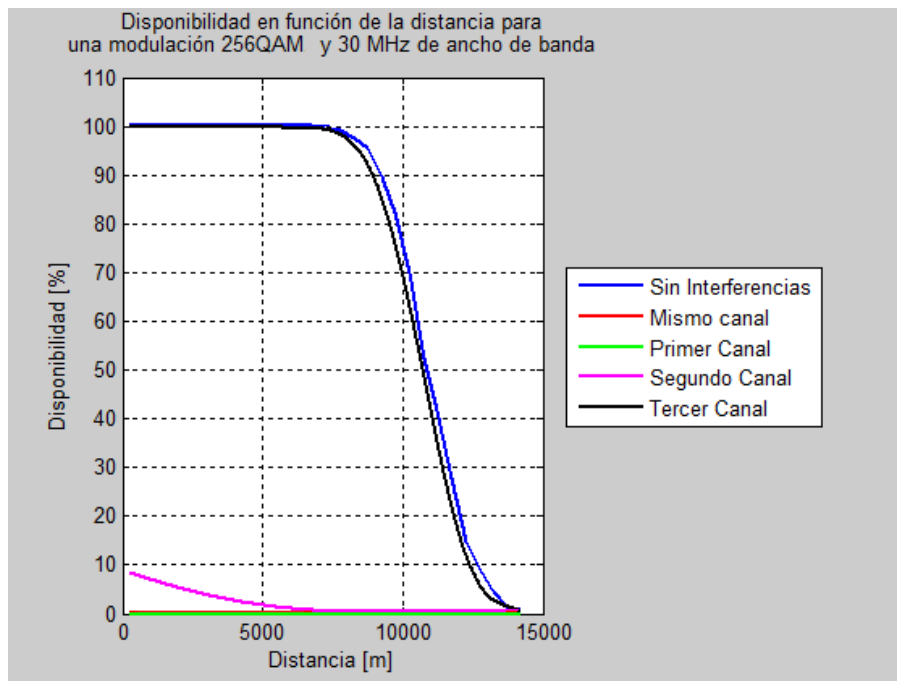


Figura 4.25 - Resultados de disponibilidad para la modulación 256QAM y un ancho de banda de 30 MHz aplicando canalización en frecuencia

Para finalizar con los resultados por canalización en frecuencia se mostrarán los referentes a la modulación 256QAM. En la figura 4.25 se observarán los correspondientes a la disponibilidad para un ancho de banda de 30 MHz. Al ser esta modulación la menos robusta de todas las analizadas, se verá que se hace necesario obtener una separación mínima de hasta tres canales entre la señal útil e interferente para aproximarse a los resultados que se obtendrían para el caso en ausencia de interferencias, ya que se aprecia que para el primer y segundo canal adyacente no podrá conseguirse más de un 10% de disponibilidad, lo que impedirá todavía un correcto funcionamiento del radioenlace.

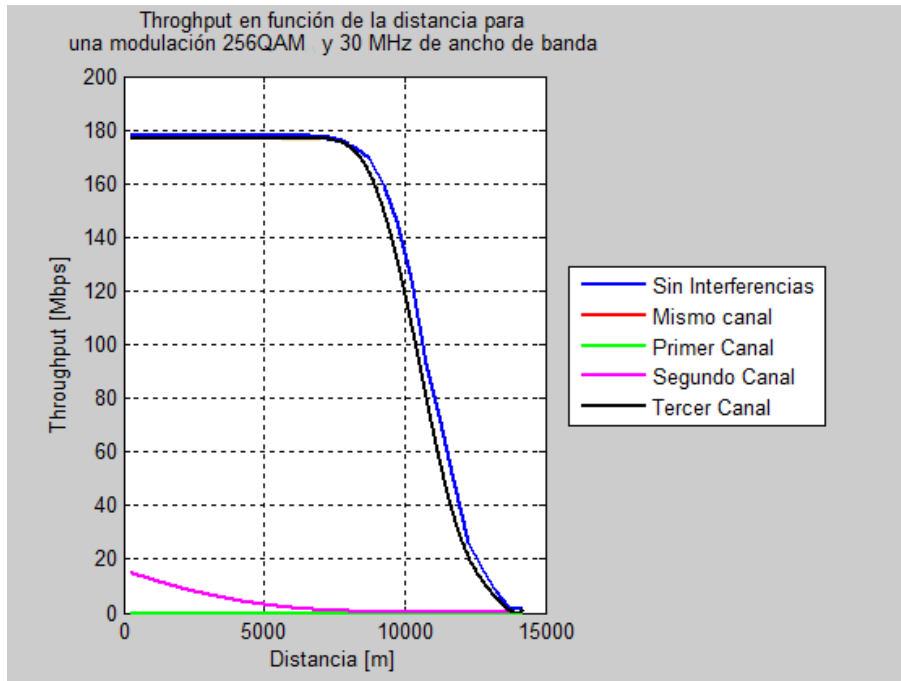


Figura 4.26 - Resultados de throughput para la modulación 256QAM y un ancho de banda de 30 MHz aplicando canalización en frecuencia

Para el caso de los datos de velocidad de transmisión (figura 4.26) ocurre un efecto muy parecido, observándose igualmente que para una separación con la señal interferente de tan sólo uno o dos canales no se podrá garantizar ni un mínimo de 20 Mbps. Si por el contrario se recurre a una separación de tres canales, los resultados serán mucho más positivos, pudiendo ajustarse al límite tecnológico impuesto por esta modulación.

4.4.2 Comparativa aplicando polarizaciones cruzadas

En esta nueva sección se estudiará cómo afecta el hecho de hacer uso de polarizaciones ortogonales como técnica para la reducción del efecto negativo que produce una señal interferente sobre un radioenlace.

De teoría de antenas se puede decir que ésta es capaz de transmitir y/o recibir con dos tipos de polarizaciones distintas y ortogonales entre sí, que son horizontal y vertical. El hecho de que ambas sean ortogonales facilitará que la información transmitida con una de ellas no será capaz de interferir a otra señal con polarización distinta, por lo que éste será el efecto que ayudará durante los próximos resultados a disminuir la potencia con la que la señal interferente llega al equipo receptor de la señal útil.

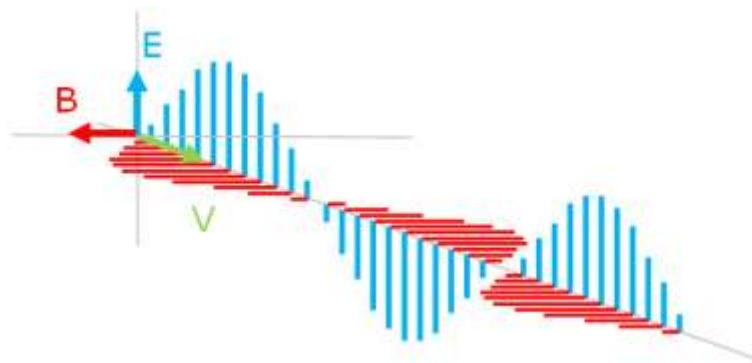


Figura 4.27 - Polarización vertical (azul) y polarización horizontal (rojo)

Podrán observarse hasta seis resultados distintos en una misma representación gráfica, dependiendo del tipo de polarización que se aplique en transmisión y recepción para la señal útil y la interferencia. Estos serán:

- Señal útil (Pol. V) en ausencia de interferencias – $[\mathbf{xV}]$
- Señal útil (Pol. H) en ausencia de interferencias – $[\mathbf{xH}]$
- Señal útil (Pol. V) afectada por interferencias (Pol. V) – $[\mathbf{VV}]$
- Señal útil (Pol. H) afectada por interferencias (Pol. H) – $[\mathbf{HH}]$
- Señal útil (Pol. V) afectada por interferencias (Pol. H) – $[\mathbf{HV}]$
- Señal útil (Pol. H) afectada por interferencias (Pol. V) – $[\mathbf{VH}]$

Es importante comentar también que los valores de nivel de lóbulo principal a secundario (NLPS) para un ángulo de 5° y los cuatro posibles casos de polarizaciones para la antena *HPLP1-18* de *Radiowaves Inc.* vienen recogidos en la tabla 4.6, obtenidos del anexo I donde se incluyen las especificaciones de la antena.

Polarización VV	Polarización HV	Polarización HH	Polarización VH
-15,5 dB	-30 dB	-15 dB	-36,5 dB

Tabla 4.6 - NLPS para un ángulo de 5° para las distintas polarizaciones de la antena *HPLP1-18* de *Radiowaves Inc.*

4.4.2.1 Resultados

En un primer lugar, para la modulación QPSK, que de por sí ya es una modulación robusta tal y como se vio en la sección 4.3.1 del presente trabajo, podrían aplicarse adicionalmente polarizaciones cruzadas para conseguir todavía pequeñas mejoras. Éstas se representan en la figura 4.28, donde puede observarse que para sistemas en los que la señal útil y la interferencia trabajan a una misma polarización el funcionamiento será peor que si lo hacen con polarizaciones ortogonales, como se había ya comentado anteriormente; así como también puede indicarse que a la vista de los resultados, aquellos casos en los que la señal de datos se reciba con polarización horizontal, los valores de disponibilidad y *throughput* serán ligeramente inferiores a si se hiciera con polarización vertical.

La representación gráfica de la tasa de transmisión de datos para esta modulación y ancho de banda no se incluyen por no apreciarse mejoras significativas.

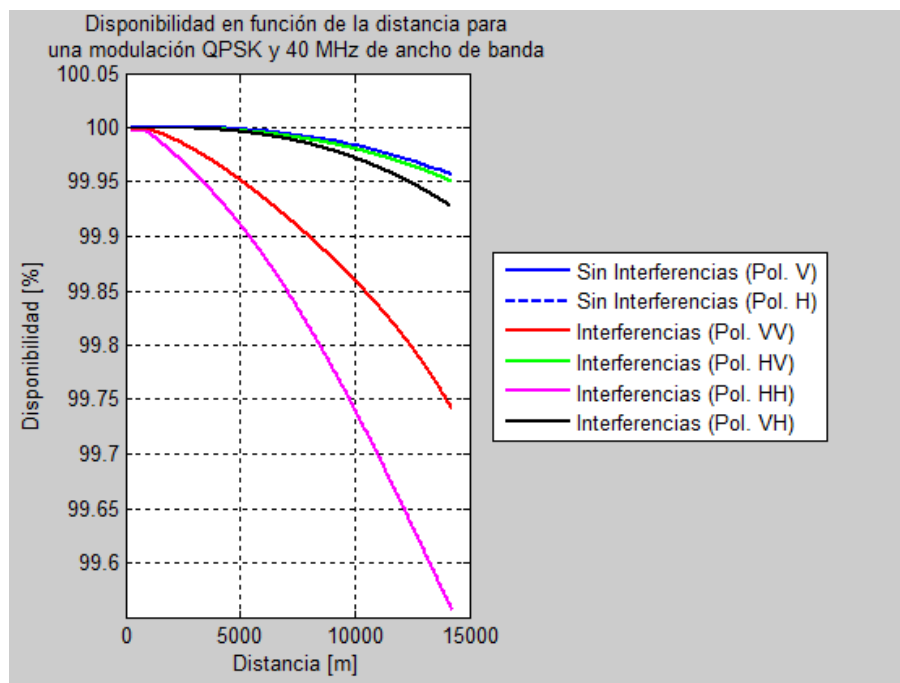


Figura 4.28 - Resultados de disponibilidad para la modulación QPSK y un ancho de banda de 40 MHz aplicando polarizaciones cruzadas

Si por el contrario en el sistema propuesto se hiciera uso de la modulación 16QAM, los resultados de disponibilidad coincidirían con los mostrados en la figura 4.29. Aquí ya se puede observar cómo para los casos en los que las polarizaciones de ambas señales coinciden, los valores de disponibilidad serán demasiado bajos como para garantizar el funcionamiento óptimo de la red. Si en cambio se aplicara una simple modificación en la polarización de una de las dos señales, los resultados serían completamente distintos, asegurando disponibilidades próximas al 100%, tal y como ocurriría igualmente si no existieran interferencias próximas al radioenlace.

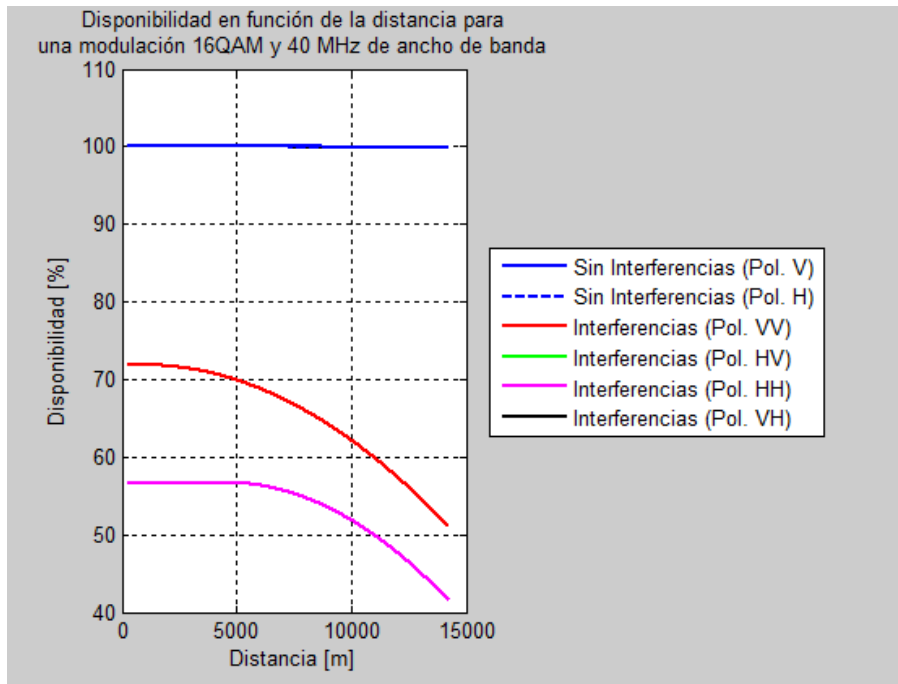


Figura 4.29 - Resultados de disponibilidad para la modulación 16QAM y un ancho de banda de 40 MHz aplicando polarizaciones cruzadas

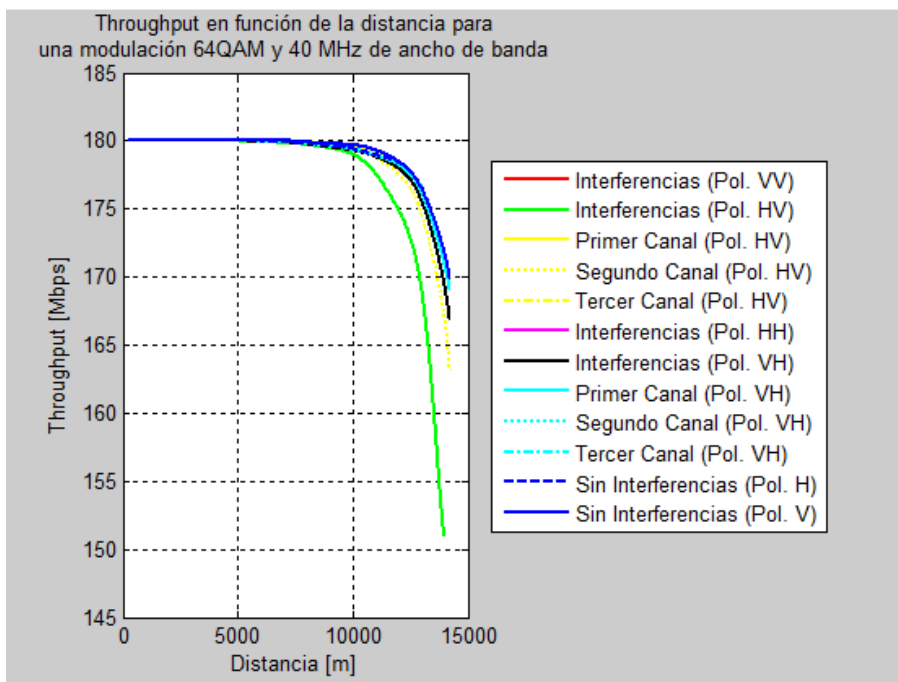


Figura 4.30 - Resultados de throughput para la modulación 64QAM y un ancho de banda de 40 MHz aplicando polarizaciones cruzadas y canalización en frecuencia

Una vez las modulaciones comienzan a tener demasiados símbolos en su constelación, las polarizaciones cruzadas comienzan cada vez a hacerse menos efectivas, y es posible que se haga necesario la combinación de las dos técnicas vistas hasta ahora para mejorar al máximo posible la capacidad del radioenlace.

Para el caso de hacer uso de una modulación 64QAM con un ancho de banda de 40 MHz, como el representado en la figura 4.30, se observará que al configurarse una polarización horizontal para la señal interferente y vertical para la señal útil (línea verde), todavía el valor de *throughput* estará ligeramente alejado del caso óptimo en el que no afectan las interferencias (línea azul). ¿Cuál será la solución a adoptar por lo tanto en este caso? La respuesta es bien sencilla, y será simplemente, una vez fijadas las polarizaciones ortogonales, aplicar canalización en frecuencia que permitirá mejorar todavía más las características del sistema. Para el caso que se está tratando, únicamente con hacer uso del primer canal adyacente se conseguiría ya una mejora bastante significativa.

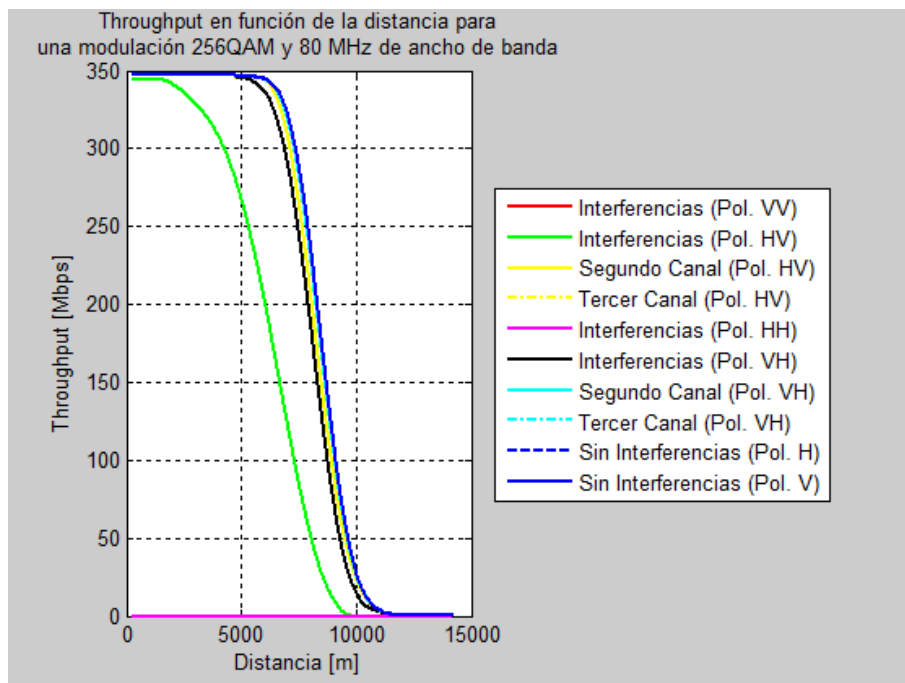


Figura 4.31 - Resultados de *throughput* para la modulación 256QAM y un ancho de banda de 80 MHz aplicando polarizaciones cruzadas y canalización en frecuencia

Ya para finalizar observar que un efecto parecido al comentado en el párrafo anterior ocurre también para la modulación 256QAM, aunque de forma incluso más acentuada que para 64QAM. En el caso de la figura 4.31 se incluye la variación de la tasa de datos para un ancho de banda de 80 MHz, aunque esta representación es similar también para al resto de anchos de banda disponibles.

Se observa igualmente que para el caso en el que las interferencias actúan en polarización horizontal y señal útil en vertical (línea verde), al aplicar canalización en frecuencia es posible aproximarse mucho al caso ideal (línea azul). No obstante sería mejor incluso que la señal interferente trabajara con polarización vertical y tan sólo fijando la polarización del radioenlace útil a horizontal se conseguirían resultados muy parecidos; aunque también es cierto que en determinados casos la señal interferente puede pertenecer al radioenlace de otro operador, y por lo tanto estará fuera de nuestro alcance poder modificar su polarización.

Capítulo 5. Pliego de condiciones

5.1 Metodología de trabajo

En el presente capítulo se pasará a realizar un diseño real de una red punto a multipunto basada en técnicas de reducción de interferencias por canalización en frecuencia y polarizaciones cruzadas, tras haber realizado un estudio previo cuyos resultados han sido presentados en el capítulo anterior.

Es importante destacar que la red punto a multipunto no debe concebirse como si se tratara de un sistema de distribución de señal en el que existe un único transmisor situado en la estación base y por otro lado múltiples usuarios actuando como receptores de dicha señal. Realmente el diseño de esta red punto a multipunto se debe interpretar como un conjunto de radioenlaces punto a punto con la característica que uno de los extremos de cada uno de ellos está situado en un mismo lugar para todos los radioenlaces. Este hecho implicará que cada enlace no tiene por qué transportar necesariamente la misma información, y es por ello por lo que se hace necesario aplicar técnicas de reducción de interferencias, ya que en uno de los extremos todos los equipos están muy próximos entre sí.

Por último indicar que al final del capítulo se incluirá un presupuesto incluyendo los equipos utilizados para el diseño de esta red.

5.2 Planos de la red

La red que se pretende diseñar en el presente capítulo se realizará en una zona rural que no se vea afectada por edificios de gran altura y cuyos radioenlaces mantengan línea de visión directa (*LoS – Line of Sight*). Cumpliendo estas características se ha decidido realizar entre cuatro localidades de la provincia de Ciudad Real, cuyo nodo central estará situado en el ayuntamiento de Villarta de San Juan, el cual estará conectado mediante tres radioenlaces a los ayuntamientos de Arenas de San Juan, Villarrubia de los Ojos y Las Labores, tal y como puede apreciarse en la figura 5.1. Se incluyen también las figuras 5.2, 5.3 y 5.4, que se corresponden con la orografía del terreno para cada radioenlace.



Figura 5.1 - Plano aéreo de la red punto a multipunto

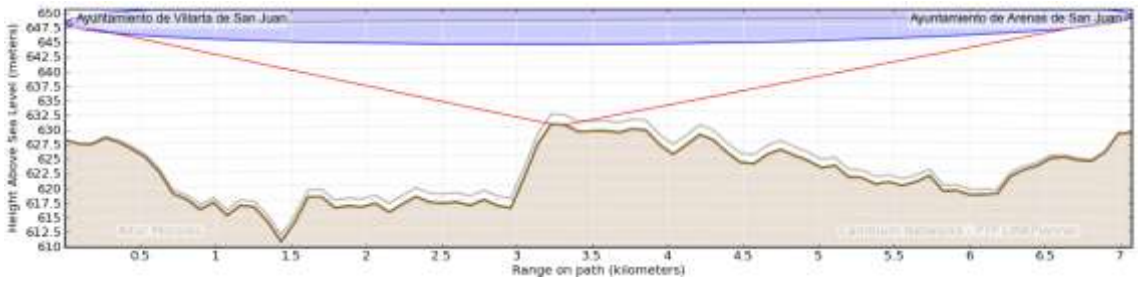


Figura 5.2 - Orografía para el enlace con Arenas de San Juan

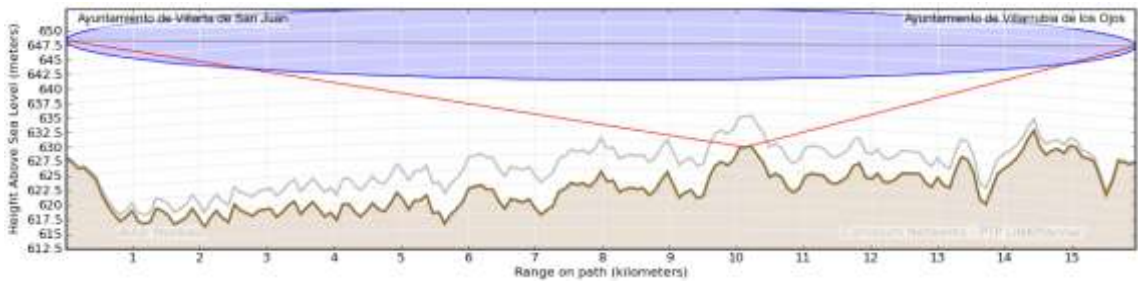


Figura 5.3 - Orografía para el enlace con Villarrubia de los Ojos

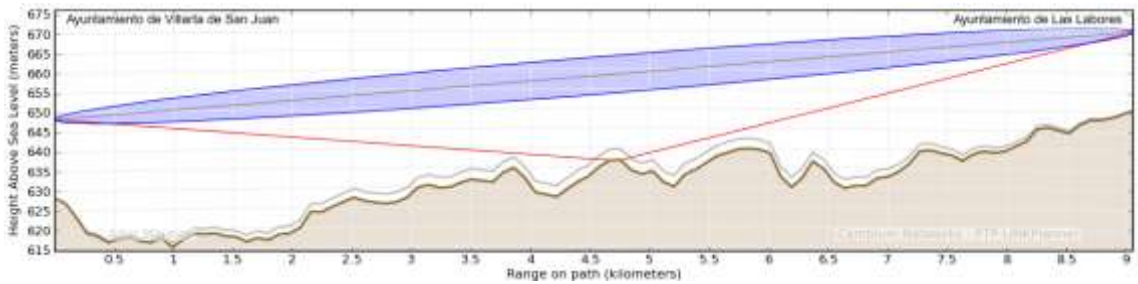


Figura 5.4 - Orografía para el enlace con Las Labores

5.3 Características de la red y los equipos

Una vez se realiza el diseño ya mostrado, pueden presentarse a continuación las características principales de esta red. En primer lugar se incluyen en la tabla 5.1 la posición geográfica de las cuatro estaciones base, junto con la distancia de cada una de ellas al ayuntamiento de Villarta de San Juan.

	Latitud	Longitud	Distancia
Villarta de San Juan	39.23890 N	3.42481 O	0 m.
Las Labores	39.27491 N	3.51902 O	9060 m.
Villarrubia de los Ojos	39.21796 N	3.60758 O	15952 m.
Arenas de San Juan	39.21976 N	3.50303 O	7081 m.

Tabla 5.1 - Posición geográfica y distancia para cada estación base

También se apreciará que entre los tres radioenlaces formarán determinados ángulos, como los mostrados en la tabla 5.2, que serán de gran utilidad para calcular el nivel de interferencias que captará la antena para una determinada separación angular.

	Las Labores	Villarrubia de los Ojos	Arenas de San Juan
Las Labores	---	34,5°	43,6°
Villarrubia de los Ojos	34,5°	---	9,1°
Arenas de San Juan	43,6°	9,1°	---

Tabla 5.2 - Separación angular entre los radioenlaces

Tal y como en el estudio del capítulo 4 se ha realizado, para este diseño se hará uso nuevamente de la antena *HPLP1-18* de *Radiowaves Inc.* cuyas características aparecen recogidas en el anexo I del presente documento. Según el catálogo del fabricante, el decremento que sufrirá el valor de las interferencias para cada ángulo y en función del tipo de polarización utilizada para cada señal útil e interferente se recoge en las tablas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6, siendo las polarizaciones Vertical-Vertical, Horizontal-Vertical, Horizontal-Horizontal y Vertical-Horizontal, respectivamente.

	Las Labores	Villarrubia de los Ojos	Arenas de San Juan
Las Labores	---	-38,6 dB	-42,3 dB
Villarrubia de los Ojos	-38,6 dB	---	-29 dB
Arenas de San Juan	-42,3 dB	-29 dB	---

Tabla 5.3 - NLPS en función del ángulo para polarización VV

	Las Labores	Villarrubia de los Ojos	Arenas de San Juan
Las Labores	---	-48,8 dB	-50,8 dB
Villarrubia de los Ojos	-48,8 dB	---	-34,9 dB
Arenas de San Juan	-50,8 dB	-34,9 dB	---

Tabla 5.4 - NLPS en función del ángulo para polarización HV

	Las Labores	Villarrubia de los Ojos	Arenas de San Juan
Las Labores	---	-35 dB	-37,8 dB
Villarrubia de los Ojos	-35 dB	---	-26,7 dB
Arenas de San Juan	-37,8 dB	-26,7 dB	---

Tabla 5.5 - NLPS en función del ángulo para polarización HH

	Las Labores	Villarrubia de los Ojos	Arenas de San Juan
Las Labores	---	-50,6 dB	-55,1
Villarrubia de los Ojos	-50,6 dB	---	-38,3 dB
Arenas de San Juan	-55,1 dB	-38,3 dB	---

Tabla 5.6 - NLPS en función del ángulo para polarización VH

Por último es importante indicar las características de los tres enlaces radio a simular, que serán aquellas recogidas en la tabla 5.7.

Banda	18 GHz
Canal Tx/Rx	19300 MHz / 17740 MHz
Equipo	PTP-18800
Regulación	FCC
Tipo de enlace	1+0
Antena Tx/Rx	<i>Radiowaves HPLP1-18</i>
Potencia Tx	17 dBm
ATPC	Deshabilitado

Tabla 5.7 - Características de los radioenlaces

5.4 Requisitos del diseño y resultados alcanzables

Como requisitos que se fijarán para la red diseñada serán que la disponibilidad de todos los enlaces sea de como mínimo el 99,95%, lo que supondrá que el enlace no estará disponible durante 4,3 horas durante todo un año como máximo (o lo que en promedio supondrá lo mismo que no esté disponible 42,41 segundos cada día), y además que la tasa de transmisión de datos sea la máxima posible siempre y cuando se cumpla la condición anterior.

Tras haber realizado las correspondientes simulaciones de todos ellos, se recogen los valores máximos alcanzables para cada ancho de banda y modulación en ausencia de interferencias para Arenas de San Juan (tabla 5.8), Villarrubia de los Ojos (tabla 5.9) y Las Labores (tabla 5.10).

	QPSK		16QAM		64QAM		256QAM	
	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)
10 MHz	99,9995	13,84	99,9990	29,13	99,9982	42,81	—	—
20 MHz	99,9994	27,16	99,9986	58,49	99,9976	85,57	99,9947	114,39
30 MHz	99,9993	39,35	99,9986	83,38	99,9967	135,98	99,9925	177,43
40 MHz	99,9992	52,49	99,9984	111,2	99,9962	180,06	99,9911	236,59
50 MHz	99,9990	65,72	99,9978	150,83	99,9960	216,57	99,9888	302,13
80 MHz	99,9990	77,15	99,9980	163,95	99,9956	255,21	99,9887	347,15

Tabla 5.8 - Disponibilidad y throughput máximos alcanzables para Arenas de San Juan

	QPSK		16QAM		64QAM		256QAM	
	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)
10 MHz	99,9966	13,84	99,9926	29,13	99,9861	42,1	—	—
20 MHz	99,9955	27,16	99,9898	58,48	99,9806	85,55	99,9488	114,34
30 MHz	99,9947	39,35	99,9845	83,37	99,9723	135,94	99,9165	177,29
40 MHz	99,9940	52,49	99,9877	111,19	99,9669	180	99,8918	236,35
50 MHz	99,9931	65,72	99,9830	150,8	99,9642	216,5	99,8125	301,59
80 MHz	99,9929	77,14	99,9848	163,93	99,9600	255,12	99,8083	346,52

Tabla 5.9 - Disponibilidad y throughput máximos alcanzables para Villarrubia de los Ojos

	QPSK		16QAM		64QAM		256QAM	
	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)	Disp. (%)	Thro. (Mbps)
10 MHz	99,9989	13,84	99,9977	29,13	99,9958	42,81	—	—
20 MHz	99,9985	27,16	99,9968	58,49	99,9944	85,57	99,9876	114,39
30 MHz	99,9983	39,35	99,9967	83,38	99,9924	135,97	99,9822	177,41
40 MHz	99,9980	52,49	99,9962	111,2	99,9912	180,04	99,9786	236,56
50 MHz	99,9978	65,72	99,9950	150,82	99,9907	216,56	99,9725	302,08
80 MHz	99,9977	77,15	99,9945	163,94	99,9898	255,19	99,9722	347,09

Tabla 5.10 - Disponibilidad y throughput máximos alcanzables para Las Labores

Tal y como puede observarse en las tres tablas anteriores, aparecen destacados los valores que cumplen los requisitos enunciados al inicio de esta sección, fijando la modulación y ancho de banda necesarios para conseguir el máximo valor de *throughput* posible para una disponibilidad por encima del 99,95%. Las características fijadas por lo tanto para cada radioenlace serán las de la tabla 5.11.

	Modulación	Ancho de banda	Max. Disp.	Max. Throug.
Arenas de San Juan	256-QAM	80 MHz	99,9887 %	347,15 Mbps
Villarrubia de los Ojos	64-QAM	80 MHz	99,9600 %	255,12 Mbps
Las Labores	256-QAM	80 MHz	99,9722 %	347,09 Mbps

Tabla 5.11 - Modulación y ancho de banda para cada radioenlace

5.5 Resultados

Llegados a esta sección se presentarán los resultados obtenidos de las simulaciones para los tres radioenlaces propuestos, teniendo en cuenta las interferencias que se provocarán entre ellos. Antes de comenzar, tal y como puede verse en la figura 5.1, el enlace que se verá más afectado será el correspondiente a Villarrubia de los Ojos, por ser aquel que se encuentra más alejado y que además se verá interferido principalmente por el enlace de Arenas de San Juan, que forma un ángulo relativamente pequeño con respecto a él y además está muy próximo a la estación de Villarta de San Juan.

Este hecho que se acaba de comentar se observa a la perfección en las tablas 5.12 y 5.13, cuyos resultados son los correspondientes a las modulaciones y anchos de banda fijados anteriormente en la tabla 5.11, cuando todos los radioenlaces transmiten en un mismo canal de frecuencia y a una misma polarización, siendo la primera de las tablas con polarización vertical y la segunda con polarización horizontal.

	Disponibilidad	Indisponibilidad	Throughput
Arenas de San Juan	99,9705 %	2,6 horas/año	347,09 Mbps
Villarrubia de los Ojos	39,1720 %	222 días/año	99,97 Mbps
Las Labores	99,9626 %	3,3 horas/año	347,06 Mbps

Tabla 5.12 - Disponibilidad y throughput para un mismo canal en frecuencia y polarización vertical

	Disponibilidad	Indisponibilidad	Throughput
Arenas de San Juan	99,9049 %	8,3 horas/año	346,86 Mbps
Villarrubia de los Ojos	0,838 %	362 días/años	2,14 Mbps
Las Labores	99,8734 %	11,09 horas/año	346 Mbps

Tabla 5.13 - Disponibilidad y throughput para un mismo canal en frecuencia y polarización horizontal

Efectivamente, el enlace perteneciente a Villarrubia de los Ojos se ve tremendamente afectado por las interferencias próximas de los otros dos enlaces radio. Debido a que se observa que en este entorno y a la frecuencia de trabajo de 18 GHz la polarización horizontal se ve más afectada que la vertical, se decidirá fijar para el radioenlace de Villarrubia de los Ojos una polarización vertical, por ser el enlace más crítico, quedando recogidas las nuevas características del diseño referentes a la polarización en la tabla 5.14.

	Polarización
Arenas de San Juan	Horizontal
Villarrubia de los Ojos	Vertical
Las Labores	Horizontal

Tabla 5.14 - Polarización para cada radioenlace

Una vez ya se hayan fijado las polarizaciones tal y como se ha especificado, se pasan a realizar de nuevo las pruebas de simulación con las que obtener los nuevos resultados de disponibilidad y tasa de transmisión de datos, para observar cómo ahora las interferencias deberían afectar en menor medida. Dichos valores quedan indicados en la tabla 5.15.

	Disponibilidad	Indisponibilidad	Throughput
Arenas de San Juan	99,9716 %	2,5 horas/año	347,15 Mbps
Villarrubia de los Ojos	99,5238 %	40,8 horas/año	254 Mbps
Las Labores	99,9022 %	8,6 horas/año	346,85

Tabla 5.15 - Disponibilidad y throughput para un mismo canal en frecuencia y polarizaciones cruzadas entre radioenlaces adyacentes

¿Qué conclusiones pueden obtenerse llegados a este punto? En primer lugar se comprueba que el enlace de Arenas de San Juan cumple perfectamente los requisitos fijados al principio. Por otro lado, para los otros dos radioenlaces se observará que a pesar de que los valores de *throughput* sean próximos a los máximos alcanzables indicados en la tabla 5.11, lo que supone ya un hecho importante, los valores de disponibilidad todavía permanecen por debajo del 99,95 % que se había fijado como requisito. La solución a adoptar en este momento será por lo tanto aplicar canalización en frecuencia, mediante la cual podrá conseguirse una disminución mayor del nivel de interferencias.

Se decide hacer uso de una separación de dos canales entre radioenlaces adyacentes, siendo la separación entre canal y canal de 80 MHz. Los canales escogidos quedarán como los mostrados en la tabla 5.16.

	Canal Tx	Canal Rx
Arenas de San Juan	19300 MHz	17740 MHz
Villarrubia de los Ojos	19380 MHz	17820 MHz
Las Labores	19460 MHz	17900 MHz

Tabla 5.16 - Canales en transmisión y recepción para cada radioenlace

Fijando por lo tanto los canales de transmisión (ida) y recepción (vuelta) con la estación base situada en el ayuntamiento de Villarta de San Juan, podrán observarse nuevas mejoras en la disponibilidad de los tres enlaces, ya que ahora las interferencias provocadas entre ellos son menores. Estos valores se adjuntan en la tabla 5.17.

	Disponibilidad	Indisponibilidad	Throughput
Arenas de San Juan	99,9873 %	1,1 horas/año	347,15 Mbps
Villarrubia de los Ojos	99,9563 %	3,8 horas/año	255,11 Mbps
Las Labores	99,9681 %	2,8 horas/año	347,08 Mbps

Tabla 5.17 - Disponibilidad y throughput aplicando polarizaciones cruzadas y canalización en frecuencia

5.6 Características finales de cada radioenlace

Una vez se han realizado todos los cambios oportunos, se indican a continuación las características finales de cada uno de los enlaces para su implantación, con las que se conseguirán el máximo *throughput* para un disponibilidad por encima del 99,95%.

5.6.1 Villarta de San Juan - Arenas de San Juan

	Descripción	Datos	Datos
1	Orografía del terreno		
2	Ubicación de la estación base	Villarta de San Juan	Arenas de San Juan
3	Latitud	39.23890 N	39.21976 N
4	Longitud	3.42481 O	3.50303 O
5	Distancia	7081 m.	
6	Tipo de antena	HPLP1-18 (<i>Radiowaves</i>)	HPLP1-18 (<i>Radiowaves</i>)
7	Ganancia de la antena	34 dBi	34 dBi
8	Frecuencia	18 GHz	
9	Canal en transmisión	17740 MHz	19300 MHz
10	Canal en recepción	19300 MHz	17740 MHz
11	Espaciado TX/RX	1560 MHz	
12	Equipo	PTP 18800 with ODU-B	
13	Regulación	FCC	
14	Tipo de enlace	1+0	
15	Ancho de banda	80 MHz	
16	Polarización en transmisión	Horizontal	Horizontal
17	Polarización en recepción	Horizontal	Horizontal
18	ATPC	Deshabilitado	
19	Mástil	10 m.	11 m.
20	PIRE máxima	51,4 dBm	50,6 dBm
21	Potencia de transmisión	17 dBm	17 dBm
22	Nivel de señal recibido	-51 dBm ± 5 dB	-50 dBm ± 5 dB
23	<i>Throughput</i> medio	347,15 Mbps	347,16 Mbps
24	Disponibilidad requerida	99,95 %	
25	Disponibilidad mínima	99,9873 %	99,9913 %
26	<i>Throughput</i> agregado	694,31 Mbps	
27	Disponibilidad total	99,9859 %	
28	Margen de ganancia del sistema	13,79 dB	
29	Pérdidas por espacio libre	134,89 dB	
30	Pérdidas por absorción atmosférica	0,48 dB	
31	Pérdidas totales	135,37 dB	

Tabla 5.18 - Características finales del enlace a Arenas de San Juan

5.6.2 Villarta de San Juan - Villarrubia de los Ojos

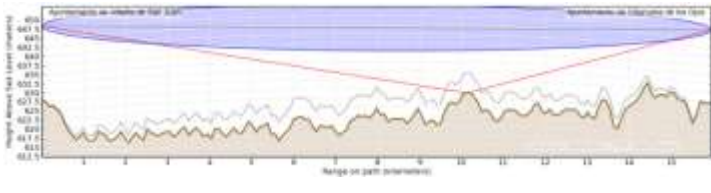
	Descripción	Datos	Datos
1	Orografía del terreno		
2	Ubicación de la estación base	Villarta de San Juan	Villarrubia de los Ojos
3	Latitud	39.23890 N	39.21796 N
4	Longitud	3.42481 O	3.60758 O
5	Distancia	15952 m	
6	Tipo de antena	HPLP1-18 (Radiowaves)	HPLP1-18 (Radiowaves)
7	Ganancia de la antena	34 dBi	34 dBi
8	Frecuencia	18 GHz	
9	Canal en transmisión	17820 MHz	19380 MHz
10	Canal en recepción	19380 MHz	17820 MHz
11	Espaciado TX/RX	1560 MHz	
12	Equipo	PTP 18800 with ODU-B	
13	Regulación	FCC	
14	Tipo de enlace	1+0	
15	Ancho de banda	80 MHz	
16	Polarización en transmisión	Vertical	Vertical
17	Polarización en recepción	Vertical	Vertical
18	ATPC	Deshabilitado	
19	Mástil	11 m.	11 m.
20	PIRE máxima	51,4 dBm	50,7 dBm
21	Potencia de transmisión	17 dBm	17 dBm
22	Nivel de señal recibido	-59 ± 5 dB	-57 ± 5 dB
23	Throughput medio	255,11 Mbps	255,14 Mbps
24	Disponibilidad requerida	99,95 %	
25	Disponibilidad mínima	99,9563 %	99,9697 %
26	Throughput agregado	510,25 Mbps	
27	Disponibilidad total	99,9528 Mbps	
28	Margen de ganancia del sistema	12,13 dB	
29	Pérdidas por espacio libre	141,94 dB	
30	Pérdidas por absorción atmosférica	1,09 dB	
31	Pérdidas totales	143,03 dB	

Tabla 5.19 - Características finales del enlace a Villarrubia de los Ojos

5.6.3 Villarta de San Juan - Las Labores

	Descripción	Datos	Datos
1	Orografía del terreno		
2	Ubicación de la estación base	Villarta de San Juan	Las Labores
3	Latitud	39.23890 N	39.27491 N
4	Longitud	3.42481 O	3,51902 O
5	Distancia	9060 m	
6	Tipo de antena	HPLP1-18 (Radiowaves)	HPLP1-18 (Radiowaves)
7	Ganancia de la antena	34 dBi	34 dBi
8	Frecuencia	18 GHz	
9	Canal en transmisión	17900 MHz	19460 MHz
10	Canal en recepción	19460 MHz	17900 MHz
11	Espaciado TX/RX	1560 MHz	
12	Equipo	PTP 18800 with ODU-B	
13	Regulación	FCC	
14	Tipo de enlace	1+0	
15	Ancho de banda	80 MHz	
16	Polarización en transmisión	Horizontal	Horizontal
17	Polarización en recepción	Horizontal	Horizontal
18	ATPC	Deshabilitado	
19	Mástil	11 m.	10 m.
20	PIRE máxima	51,4 dBm	50,7 dBm
21	Potencia de transmisión	17 dBm	17 dBm
22	Nivel de señal recibido	-53 ± 5 dB	-52 ± 5 dB
23	Throughput medio	347,08 Mbps	347,12 Mbps
24	Disponibilidad requerida	99,95%	
25	Disponibilidad mínima	99,9681 %	99,9796 %
26	Throughput agregado	694,20 Mbps	
27	Disponibilidad total	99,9656 %	
28	Margen de ganancia del sistema	11,45 dB	
29	Pérdidas por espacio libre	137,03 dB	
30	Pérdidas por absorción atmosférica	0,62 dB	
31	Pérdidas totales	137,64 dB	

Tabla 5.20 - Características finales del enlace a Las Labores

5.7 Presupuesto de ejecución

#	Ítem	Cantidad	Precio (€/Unidad)	Precio T. (sin IVA)	Precio T. (con IVA)
1	PTP800 Modem 100/100BaseT – 10 Mbps	6 u.	1.685 €	10.110 €	12.233,1 €
2	PTP800 Modem – 400 Mbps	6 u.	1.538 €	9.228 €	11.165,9 €
3	ODU-B 18 GHz TR1560 (17700,0 - 18140,0 MHz)	3 u.	2.160 €	6.480 €	7.840,8 €
4	ODU-B 18 GHz TR1560 (19260,0 - 19700,0 MHz)	3 u.	2.160 €	6.480 €	7.840,8 €
5	Antena HPLP1-18 – Radiowaves 30 cm (17,7 - 19,7 GHz)	6 u.	492 €	2.952 €	3.571,9 €
6	Kit de terminación de la Unidad de Procesamiento Local (LPU) para PTP 800 – <i>Se requiere un kit por cable coaxial</i>	6 u.	269 €	1.614 €	1.952,9 €
7	Kit de piezas para la instalación del cable coaxial	6 u.	192 €	1.152 €	1.393,9 €
8	Cable coaxial trenzado – 50 Ohm – 75 metros	3 u.	308 €	924 €	1.118 €
9	Convertidor de fuente de alimentación AC-DC (Convierte 110/230 V a 48 V)	6 u.	154 €	924 €	1.118 €
10	Agarre para cable CNT-400	6 u.	13 €	78 €	94,4 €
11	Cables de red – Doble toma a tierra (PTP800 AC-DC Fuente de Alimentación)	6 u.	8 €	48 €	58,1 €
	Mano de Obra - Instalación (horas)	200 h.	35 €/h	7.000 €	8470 €
TOTAL					56.857,9 €

Capítulo 6. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

Llegados a este punto del trabajo, habiéndose hecho ya el correspondiente estudio de cómo afectan las interferencias en un sistema con topología punto a multipunto y habiendo realizado su posterior implantación en un diseño real, pueden llegarse a obtener varias conclusiones al respecto.

En primer lugar se ha analizado cómo se hace necesario hacer uso de técnicas de reducción de interferencias en un sistema de este tipo, como pueden ser polarizaciones cruzadas o aplicando canalización en frecuencia. El hecho de existir varios radioenlaces próximos trabajando a una misma frecuencia e incluso a una misma polarización, da lugar a que si se necesitan alcanzar elevadas tasas de transmisión de forma conjunta a disponibilidades próximas al 100%, objetivos únicamente alcanzables con modulaciones con un elevado número de símbolos (64QAM o 256QAM) pero con el inconveniente de que resultan ser las modulaciones menos robustas, es imprescindible aplicar técnicas como las estudiadas.

En el caso de estudio previo se ha analizado la efectividad de estas técnicas, consiguiendo un menor impacto de las interferencias creadas entre los enlaces radio más próximos. Por otro lado, debido a que el desarrollo de los sistemas inalámbricos ha posibilitado realizar despliegues a bajo coste en zonas rurales, donde hacerlo mediante una red cableada no es rentable, se ha realizado un posible diseño real en una zona rural aplicando todas estas técnicas de reducción de interferencias.

Como propuesta de trabajo futuro se ha pensado en la posibilidad de implantar Icinga en el caso de que la red diseñada aumentara progresivamente con otros nuevos radioenlaces y otros sistemas punto a multipunto entre otras poblaciones. Icinga se trata de un sistema de monitorización de redes basado en Nagios y de código abierto que permite vigilar el funcionamiento de una red, detectar cualquier fallo o caída del sistema, enviar notificaciones a los usuarios con los errores y recuperaciones de un enlace y generar gráficas de rendimiento e informes.

Capítulo 7. Bibliografía

[1] **Ministerio de Industria, Energía y Turismo**, "*Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias 2013*"

(<http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/espectro/paginas/cnaf.aspx>)

[2] **Recomendación UIT-R F.592-10**, "*Radio-frequency channel arrangements for fixed wireless systems operating in the 17.7-29.7 GHz frequency band*"

(https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.595-10-201203-I!!PDF-E.pdf)

[3] **Recomendación UIT-R F.752-2**, "*Diversity techniques for point-to-point fixed wireless systems*"

(http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.752-2-200602-I!!PDF-E.pdf)

[4] **Robert J. Matheson**, "*Spectrum Usage for the Fixed Services*"

(http://www.comsearch.com/articles/ntia_report.pdf)

[5] **Ministerio de Industria, Energía y Turismo**, "*Bandas y canalizaciones disponibles en el Servicio Fijo de banda ancha*"

(<http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/Formularios/Titulos/BandaFrecuenciaServicioFijobancha.pdf>)

[6] **Francisco Ramos Pascual**, "*Planificación celular en sistemas de acceso radio punto a multipunto*", Abril 2000, GIGAtronic, p.10-13.

[7] **Icinga**, <https://www.icinga.org/>

Capítulo 8. Anexos

8.1 ANEXO I - Características de los equipos utilizados



18 GHz (17.7 - 19.7) HIGH-PERFORMANCE MICROWAVE ANTENNAS

FEATURES

- **Antenna diameters**
 - 1' (30 cm)
 - 1.5' (45 cm)
 - 2' (60 cm)
 - 3' (90 cm)
 - 4' (120 cm)
- **Antenna weights**
 - 1' 17 lbs. (7.7 kg)
 - 1.5' 19 lbs. (8.6 kg)
 - 2' 27 lbs. (12.2 kg)
 - 3' 50 lbs. (22.5 kg)
 - 4' 85 lbs. (38.3 kg)
- **HP models:** high-performance, plane polarized
- **HPD models:** dual polarized
- **IEC or EIA flanges available**
- **Direct mounting** for RF units available
- **Ease of installation:** antennas shipped completely assembled, minimal mount required
- **Planar radomes** standard with high-performance model
- **Rugged and lightweight** cast aluminum mount with fine adjustment for both azimuth and elevation
- **Compact size,** due to Radio Waves innovative feed design
- **Standard white;** other colors and/or logos available on request
- **Corrosive resistant:** coated aluminum, hot dipped galvanized steel and stainless steel
- **Three year warranty**

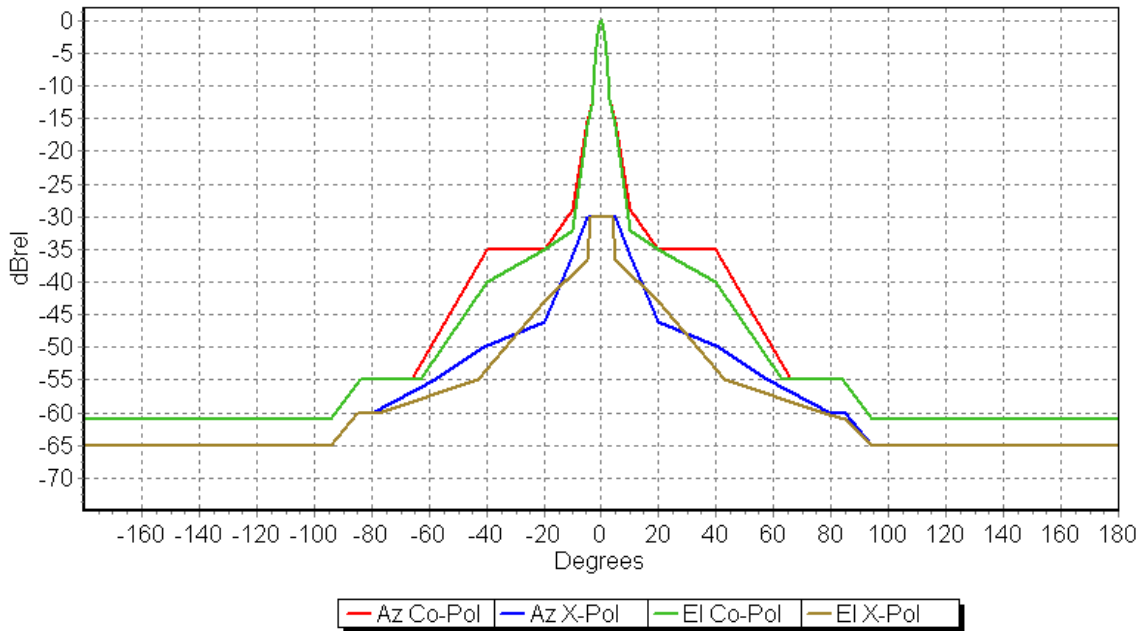


17.7 - 19.7 GHz ELECTRICAL SPECIFICATIONS (typical performance)*

Model Number	Diameter ft (cm)	Gain, dBi			Beamwidth Degrees, 3dB	X Pol. Disc., dB	F/B Ratio, dB	VSWR Max. (R.L., dB)
		Low	Mid	High				
Plane Polarized								
HPLP1-18	1 (30)	33.5	34.0	34.4	3.0	30	53	1.4:1 (15.5)
HPLPD1.5-18	1.5 (45)	35.7	36.2	36.7	2.5	30	58	1.4:1 (15.5)
HP2-18	2 (60)	38.2	38.6	39.0	2.0	30	66	1.4:1 (15.5)
HP3-18	3 (90)	41.6	42.0	42.4	1.3	30	69	1.4:1 (15.5)
HP4-18	4 (120)	44.1	44.5	44.9	1.0	30	72	1.4:1 (15.5)
Dual Polarized								
HPLPD1-18	1 (30)	33.3	33.8	34.2	3.0	30	53	1.4:1 (15.5)
HPLPD1.5-18	1.5 (45)	35.5	36.0	36.5	2.5	30	58	1.4:1 (15.5)
HPD2-18	2 (60)	38.0	38.4	38.8	2.0	30	66	1.4:1 (15.5)
HPD3-18	3 (90)	41.4	41.8	42.2	1.3	30	69	1.4:1 (15.5)
HPD4-18	4 (120)	43.8	44.3	44.7	1.0	30	72	1.4:1 (15.5)

* All specifications subject to change without notice.
For regulatory compliances, contact Radio Waves.

Radio Waves UltimateGraph™



Revision Number	NSMA WG16.99.050	Low-band Gain	33,5 dBi
Revision Date	1999/05/20	Mid-band Gain	34,2 dBi
Antenna Manufacturer	Radio Waves Inc.	High-band Gain	34,4 dBi
Model Number	HPLP-18	Mid-band Az Bmwdth	0,3
Description	1 ft Low Sidelobe Antenna	Mid-band El Bmwdth	0,3
Pattern Number	6977	Antenna Length	0,3 m
Date of Data	2009/02/19	Elevation Tilt	0°
Low Frequency	17700 MHz	Pattern Type	Envelope
High Frequency	19700 MHz	Pattern cuts	4

H/H		H/V		V/V		V/H	
-180	-61 dB	-180	-65 dB	-180	-61 dB	-180	-65 dB
-94	-61 dB	-94	-65 dB	-94	-61 dB	-94	-65 dB
-84	-55 dB	-85	-60 dB	-84	-55 dB	-85	-60 dB
-66	-55 dB	-80	-60 dB	-63	-55 dB	-78	-60 dB
-40	-35 dB	-58	-55 dB	-40	-40 dB	-43	-55 dB
-20	-35 dB	-41	-50 dB	-20	-35 dB	-20	-43 dB
-10	-29 dB	-20	-46 dB	-10	-32 dB	-5	-36,5 dB
-5	-15 dB	-10	-36 dB	-5	-15,5 dB	-4	-30 dB
-3,00	-12 dB	-5	-30 dB	-3,00	-12 dB	0	-30 dB
-2,50	-8,33 dB	0	-30 dB	-2,50	-8,33 dB		
-2,00	-5,33 dB			-2,00	-5,33 dB		
-1,50	-3,00 dB			-1,50	-3,00 dB		
-1,00	-1,33 dB			-1,00	-1,33 dB		
-0,50	-0,33 dB			-0,50	-0,33 dB		
0	0 dB			0	0 dB		



PTP 800 SPLIT-MOUNT SOLUTION

LICENSED ETHERNET MICROWAVE FOR MULTI-SERVICE NETWORKS

Cambium Point-to-Point (PTP) 800 Licensed Ethernet Microwave Solutions can efficiently and affordably transport the data, voice and video that your bandwidth-intensive applications require without having to contend with other communicators in your radio-frequency (RF) band.

SPLIT-MOUNT ARCHITECTURE

Within our PTP 800 family of products, we offer two architectures, a split-mount architecture and an all-indoor architecture. In this Specification Sheet, we detail the specifics of our Split-Mount systems. For information on our PTP 800i All-Indoor system, refer to the PTP 800i Specification Sheet.

Our PTP 800 Split-Mount systems operate in the 6 to 38 GHz licensed bands, at up to 368 Mbps throughput¹ (full duplex), and with user-configured channel bandwidths from 7 to 80 MHz. When deployed, the outdoor radio unit (ODU) and antenna are mounted on a tower or rooftop and connected via cable to the Compact Modem Unit (CMU) located inside your building or equipment housing unit.

Within the split-mount platform, you can choose between our Standard ODU-A or our High Performance ODU-B. ODU-A is available in 6 to 38 GHz frequencies, while the High Performance ODU-B is available in the 11, 18 and 23 GHz bands. The ODU-B offers higher transmit power, lower power consumption, and lighter weight when compared with the ODU-A. In addition, our NTIA-compliant 7 and 8 GHz models support DoD and non-DoD applications within the U.S. Federal Government.

COST-EFFICIENT SCALABILITY

With upgradeable capacity from 10 Mbps to full capacity via software key, PTP 800 systems offer exceptional cost efficiency and scalability, allowing you to purchase only the capacity you need today and add capacity as your needs grow. Whether your organization is a carrier, service provider, utility company, municipality, public safety organization, government agency or corporate enterprise, PTP 800 radios will provide you with high-performance, ultra-reliable connectivity and backhaul.

RADIO TECHNOLOGY

ODU-A RF bands ²	L6 GHz Band: 5.925 – 6.425 GHz
	U6 GHz Band: 6.425 – 7.100 GHz
	7 GHz Band: 7.125 – 7.9 GHz
	8 GHz Band: 7.725 – 8.47 GHz
	11 GHz Band: 10.7 – 11.7 GHz
	13 GHz Band: 12.75 – 13.25 GHz
	15 GHz Band: 14.4 – 15.35 GHz
	18 GHz Band: 17.7 – 19.7 GHz
	23 GHz Band: 21.2 – 23.6 GHz
	26 GHz Band: 24.25 – 26.5 GHz
	28 GHz Band: 27.5 – 29.5 GHz
32 GHz Band: 31.8 – 33.4 GHz	
38 GHz Band: 37.0 – 40.0 GHz	
ODU-B RF bands ²	11 GHz Band: 10.7 – 11.7 GHz
	18 GHz Band: 17.7 – 19.7 GHz
	23 GHz Band: 21.2 – 23.6 GHz
Channel size	Configurable from 7 to 80 MHz
Maximum Tx power ³	30 dBm
Best Rx sensitivity ⁴	-90.9 dBm
Modulation	QPSK to 256 QAM Fixed mode or Adaptive Coding and Modulation (ACM)
Error correction	Low Density Parity Check (LDPC) code
Duplex scheme	FDD
Security and encryption	Proprietary air interface Optional FIPS-197 compliant 128/256-Bit AES Encryption Optional FIPS 140-2 ⁵ Authenticated SNTP

ETHERNET BRIDGING

Protocol	IEEE 802.3
	802.1p/1Q (served by 8 queues)
	802.1ad (Q-in-Q)
Frame size	Up to 9600 bytes
User data throughput ⁶	10 to 368 Mbps at the Ethernet (full duplex); use our Cambium PTP LINKPlanner to determine actual throughput for the deployment
QoS	8 Queues by VLAN tag, Layer 3 DSCP and TC
Latency	To < 115 μ s @ full capacity with 64 bytes
User traffic interface	100 / 1000 Base T (RJ-45) – auto MDI/MDIX, 1000 Base SX and LX options

MANAGEMENT & INSTALLATION

Network management	Inband and out-of-band
System management	IPv6/IPv4 dual-stack management support
	Web access via browser using HTTP or HTTPS/TLS ⁷
	SNMP v1, v2c, v3, MIB II, and proprietary PTP MIB
	Cambium Wireless Manager, release 3.0 or higher
	Motorola ASTRO [®] Unified Event Manager (UEM)
	Remote authentication using RADIUS and syslog
Out-of-band interface	10 / 100 Base T (RJ-45)
Installation	ODU – RSSI output assistance for link alignment
Connection	IF cable between outdoor unit (ODU) and compact modem unit (CMU); distance up to 1000 ft. (300 meters) using the LMR600 cable; 630 ft. (190 meters) is achievable with the CNT400 IF cable

PHYSICAL

Physical configuration	Split mount – Compact Modem Unit (CMU) and Outdoor Unit (ODU)	
Dimensions	ODU: Diameter 10.5" (26.7 cm), Depth 3.5" (8.9 cm) CMU: Width 7.1" (18.0 cm), Height 1.4" (3.5 cm), Depth 8.7" (22.0 cm)	
Weight	ODU-A: 10.1 lbs (4.6 kg) ODU-B: 8.6 lbs (3.9 kg) CMU: 2.4 lbs (1.1 kg)	
Wind speed survival	ODU: 150 mph (242 kph)	
Power source	-48V DC (-40.5V DC to -60V DC)	
Power consumption	ODU-A – 1+0 Configuration (per end) 6 – 11 GHz: 71 Watts maximum 13 – 38 GHz: 62 Watts maximum	ODU-B – 1+0 Configuration (per end) 11 GHz: 58 Watts maximum 18, 23 GHz: 56 Watts maximum
	ODU-A – 1+1 Configuration (2 ODU's + 2 CMU's per end) 6 – 11 GHz: 122 Watts maximum 13 – 38 GHz: 114 Watts maximum	ODU-B – 1+1 Configuration (2-ODU's + 2-CMU's per end) 11 GHz: 98 Watts maximum 18, 23 GHz: 96 Watts maximum

ENVIRONMENTAL & REGULATORY

Operating temperature	Outdoor Unit: -27° to +131° F (-33° to +55° C) – EN 300 019-1-4 Compact Modem Unit: -27° to +131° F (-33° to +55° C) – EN 300 019-1-3	
Humidity	Outdoor Unit: Up to 100% Compact Modem Unit: Up to 95%, non-condensing	
Safety	UL 60950; IEC 60950; EN 60950; CSA 22.2 No. 60950	
EMC	USA: FCC Part 15, Class B Europe: EN 301 489-1 and EN 301 489-4	
Radio standard	ETSI Harmonized Standard EN 302 217-2-2 FCC Regulation Title 47, Part 101 Industry Canada Specification RSS-GEN and relevant SRSP Specifications	

¹ 368 Mbps maximum throughput requires a 56 MHz channel and 256 QAM which may not be available in certain regions due to regulatory restrictions.

² Regulatory conditions for RF bands may vary by geographic location and should be confirmed prior to system purchase.

³ Transmit power depends on frequency, modulation and regulations (ETSI/FCC).

⁴ Receive sensitivity depends on frequency, channel bandwidth and modulation (-90.9 dBm is based on an 11 GHz model with 7 MHz channel bandwidth and the QPSK mode).

⁵ RPS 140-2 certification status may be confirmed at: <http://csrc.nist.gov/groups/STM/cmvp/ingocess.html>

⁶ User throughput depends on the configuration of channel bandwidth, modulation and capacity license key. Radios ship with factory-set 10 Mbps throughput capacity cap; additional capacity may be purchased at time of order or anytime after deployment. Full capacity is not available for all combinations of bands and regulations.

⁷ Web access via HTTPS/TLS is available on AES-enabled radios.

Radio Configuration														
Frequency (GHz)	L6	U6	7	8	11	13	15	18	23	26	28	32	38	
Standard	ETSI / FCC	ETSI / FCC	ETSI / NTIA	ETSI / NTIA	ETSI / FCC	ETSI	ETSI / NTIA	ETSI / FCC	ETSI / FCC	ETSI / FCC	ETSI	ETSI	ETSI / FCC	
Frequency Range (GHz)	5.925 – 6.425	6.425 – 7.100	7.125 – 7.9	7.725 – 8.47	10.7 – 11.7	12.75 – 13.25	14.4 – 15.35	17.7 – 19.7	21.2 – 23.6	24.25 – 26.5	27.5 – 29.5	31.8 – 33.4	37.0 – 40.0	
FCC	T/R Spacing (MHz)	252.04	160 170	300	360		640	1560	1200	800			700	
	Channel Bandwidth (MHz)	10 30 60	10 30	10 20 30 40 50	10 20 30 40 50	10 30 40 80 ^g		7 14 28	10 20 30 40 50 80 ^h	10 20 30 40 50	10 20 40			10 50
ETSI	T/R Spacing (MHz)	252.04	340	154 161 168 196 245	119 126 208 266 311.32	490 530	266	420 490 728 315 322 644	1008 1010	1008 1232	1008	1008	812	1260
	Channel Bandwidth (MHz)	29.65	7 14 30 40 60	7 14 28	7 14 28 29.65	40	7 14 28	7 14 28 56	7 13.75 27.5 55	7 14 28 56	7 14 28 56	7 14 28 56	7 14 28 56	7 14 28 56
RF Channel Selection	Via Web GUI													
System Configuration	1 + 0, 1+1 HSB, 1+1 HSB/SD and 2+0													
ATPC Range (dB)	Transmit Power Control – Adaptive, lower power limit varies with RF band down to 1dBm minimum.													

PTP 800 Family of Products	
PTP L6800	L6 GHz
PTP U6800	U6 GHz
PTP 07800	7 GHz
PTP 08800	8 GHz
PTP 11800	11 GHz
PTP 13800	13 GHz
PTP 15800	15 GHz
PTP 18800	18 GHz
PTP 23800	23 GHz
PTP 26800	26 GHz
PTP 28800	28 GHz
PTP 32800	32 GHz
PTP 38800	38 GHz

User Ethernet Data Throughput – ODU-A and ODU-B													
Modulation	Maximum Throughput – Mbps (1518 Bytes/Frame)												
	Channel Bandwidth (MHz)												
	7	13.75	14	27.5	28/ 29.65 ^f	55	56/60/80	10	20	30	40	50	
256 QAM-H	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	364.9	368.6	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
256 QAM-L	N/A	N/A	N/A	166.9	170.4	343.6	347.2	N/A	113.6	177.4	236.7	301.6	
128 QAM	34.4	69.8	71.0	148.0	151.1	300.4	303.5	50.9	102.2	155.1	206.9	258.6	
64 QAM	30.0	60.7	61.8	122.7	125.3	252.6	255.2	42.8	84.9	130.4 / 135.5 ^g	181.9	217.4	
32 QAM	24.6	49.9	50.7	99.1	101.2	200.7	202.8	33.7	67.8	103.6	150.7	178.6	
16 QAM	20.0	40.6	41.3	73.3	74.8	150.9	152.4	29.1	58.5	77.9	103.9	150.5	
8PSK	14.7	29.9	30.4	55.7	56.8	114.6	115.8	20.4	40.3	59.1	78.9	103.7	
QPSK	10.1	20.0	20.3	37.0	37.8	76.3	77.1	13.8	28.5	39.4	52.6	65.7	

Transmit Power – ODU-A														
Modulation	Maximum Transmit Power – ETSI (dBm)								Maximum Transmit Power – FCC (dBm)					
	Frequency (GHz)								Frequency (GHz)					
	6, 7, 8	11	13, 15	18	23, 26	28	32	38	L6	7, 8	11	18	23, 26	38
QPSK	30.0	28.0	26.0	25.5	25.0	25.0	23.0	23.0	22.0	22.0	19.0	23.0	23.0	20.0
8PSK	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	22.0	22.0	19.0	22.0	22.0	19.0
16 QAM	28.0	26.0	23.0	22.0	22.0	22.0	21.0	20.0	22.0	22.0	19.0	22.0	22.0	19.0
32 QAM	28.0	26.0	23.0	22.0	22.0	20.0	19.0	20.0	22.0	22.0	19.0	22.0	22.0	19.0
64 QAM	24.0	21.0	18.0	17.0	17.0	17.0	16.0	16.0	22.0	22.0	19.0	17.0	17.0	15.0
128 QAM	24.0	21.0	18.0	17.0	17.0	17.0	16.0	16.0	22.0	22.0	19.0	17.0	17.0	15.0
256 QAM	22.0	19.0	16.0	15.0	15.0	15.0	14.0	14.0	22.0	22.0	19.0	15.0	15.0	13.0

^f The 80 MHz channel width is available only on the 11 GHz and 18 GHz ODU-B.

^g For Upper 6 GHz only, 30 MHz capacity is equal to 28 MHz capacity.

^h 135.5 Mbps is available in Lower 6 GHz.

Receive Sensitivity – ODU-A									
BER = 1e-6	Modulation	Frequency (GHz)							
		6, 7, 8	11	13, 15	18	23, 26	28	32	38
Receive Sensitivity @ 56/60 MHz channel (dBm)	256 QAM-H	-63.2	N/A	-63.7	N/A	-63.2	-62.7	-62.2	-61.2
	256 QAM-L	-65.1	N/A	-65.6	N/A	-65.1	-64.6	-64.1	-63.1
	128 QAM	-67.8	N/A	-68.3	N/A	-67.8	-67.3	-66.8	-65.8
	64 QAM	-70.8	N/A	-71.3	N/A	-70.8	-70.3	-69.8	-68.8
	32 QAM	A	N/A	A	N/A	A	-72.9	-72.4	A
	16 QAM	A	N/A	-77.7	N/A	-77.2	-76.7	-76.2	-75.2
	8PSK	A	N/A	A	N/A	A	A	A	A
	QPSK	A	N/A	-83.5	N/A	-83.0	-82.5	-82.0	-81.0
Receive Sensitivity @ 55 MHz channel (dBm)	256 QAM-H	N/A	N/A	N/A	-63.8	N/A	N/A	N/A	N/A
	256 QAM-L	N/A	N/A	N/A	-65.7	N/A	N/A	N/A	N/A
	128 QAM	N/A	N/A	N/A	-68.4	N/A	N/A	N/A	N/A
	64 QAM	N/A	N/A	N/A	-71.4	N/A	N/A	N/A	N/A
	32 QAM	N/A	N/A	N/A	A	N/A	N/A	N/A	N/A
	16 QAM	N/A	N/A	N/A	-77.8	N/A	N/A	N/A	N/A
	8PSK	N/A	N/A	N/A	A	N/A	N/A	N/A	N/A
	QPSK	N/A	N/A	N/A	-83.6	N/A	N/A	N/A	N/A
Receive Sensitivity @ 50 MHz channel (dBm)	256 QAM	-65.3	N/A	N/A	-65.8	-65.3	N/A	N/A	-62.3
	128 QAM	-68.5	N/A	N/A	-69.0	-68.5	N/A	N/A	-65.5
	64 QAM	-71.5	N/A	N/A	-72.0	-71.5	N/A	N/A	-68.5
	32 QAM	-73.8	N/A	N/A	-74.3	-73.8	N/A	N/A	-70.8
	16 QAM	-75.8	N/A	N/A	-76.3	-75.8	N/A	N/A	-72.8
	8PSK	-79.1	N/A	N/A	-79.6	-79.1	N/A	N/A	-76.1
	QPSK	-83.7	N/A	N/A	-84.2	-83.7	N/A	N/A	-80.7
Receive Sensitivity @ 40 MHz channel (dBm)	256 QAM	-66.8	-67.3	N/A	-67.3	-66.8	N/A	N/A	N/A
	128 QAM	-69.5	-70.0	N/A	-70.0	-69.5	N/A	N/A	N/A
	64 QAM	-71.9	-72.4	N/A	-72.4	-71.9	N/A	N/A	N/A
	32 QAM	-74.0	-74.5	N/A	-74.5	-74.0	N/A	N/A	N/A
	16 QAM	-78.9	-79.4	N/A	-79.4	-78.9	N/A	N/A	N/A
	8PSK	-81.1	-81.6	N/A	-81.6	-81.1	N/A	N/A	N/A
	QPSK	-84.7	-85.2	N/A	-85.2	-84.7	N/A	N/A	N/A
Receive Sensitivity @ 30 MHz channel (dBm)	256 QAM	-67.8	-68.5	N/A	-68.5	-68.0	N/A	N/A	N/A
	128 QAM	-70.7	-71.2	N/A	-71.2	-70.7	N/A	N/A	N/A
	64 QAM	-73.0	-74.2	N/A	-74.2	-73.7	N/A	N/A	N/A
	32 QAM	-76.3	-76.8	N/A	-76.8	-76.3	N/A	N/A	N/A
	16 QAM	-80.1	-80.6	N/A	-80.6	-80.1	N/A	N/A	N/A
	8PSK	-82.3	-82.8	N/A	-82.8	-82.3	N/A	N/A	N/A
	QPSK	-85.9	-86.4	N/A	-86.4	-85.9	N/A	N/A	N/A
Receive Sensitivity @ 28/29.65 ¹¹ MHz channel (dBm)	256 QAM	-68.2	N/A	-68.7	N/A	-68.2	-67.7	-67.2	-66.2
	128 QAM	-70.9	N/A	-71.4	N/A	-70.9	-70.4	-69.9	-68.9
	64 QAM	-73.9	N/A	-74.4	N/A	-73.9	-73.4	-72.9	-71.9
	32 QAM	-76.4	N/A	-76.9	N/A	-76.4	-75.9	-75.4	-74.4
	16 QAM	-80.3	N/A	-80.8	N/A	-80.3	-79.8	-79.3	-78.3
	8PSK	A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	QPSK	-86.1	N/A	-86.6	N/A	-86.1	-85.6	-85.1	-84.1

NOTE:
 "A" indicates frequencies that are supported only in the ACM mode.

¹¹ For Upper 6 GHz only, 30 MHz capacity is equal to 28 MHz capacity.

Receive Sensitivity – ODU-A (continued)

BER = 1e-6	Modulation	Frequency (GHz)							
		6, 7, 8	11	13, 15	18	23, 26	28	32	38
Receive Sensitivity @ 27.5 MHz channel (dBm)	256 QAM	N/A	N/A	N/A	-68.8	N/A	N/A	N/A	N/A
	128 QAM	N/A	N/A	N/A	-71.5	N/A	N/A	N/A	N/A
	64 QAM	N/A	N/A	N/A	-74.5	N/A	N/A	N/A	N/A
	32 QAM	N/A	N/A	N/A	-77.0	N/A	N/A	N/A	N/A
	16 QAM	N/A	N/A	N/A	-80.9	N/A	N/A	N/A	N/A
	8PSK	N/A	N/A	N/A	A	N/A	N/A	N/A	N/A
	QPSK	N/A	N/A	N/A	-86.7	N/A	N/A	N/A	N/A
Receive Sensitivity @ 20 MHz channel (dBm)	256 QAM	-69.9	N/A	N/A	-70.4	-69.9	N/A	N/A	N/A
	128 QAM	-72.0	N/A	N/A	-72.5	-72.0	N/A	N/A	N/A
	64 QAM	-75.4	N/A	N/A	-75.9	-75.4	N/A	N/A	N/A
	32 QAM	-77.8	N/A	N/A	-78.3	-77.8	N/A	N/A	N/A
	16 QAM	-80.1	N/A	N/A	-80.6	-80.1	N/A	N/A	N/A
	8PSK	-83.1	N/A	N/A	-83.6	-83.1	N/A	N/A	N/A
	QPSK	-87.1	N/A	N/A	-87.6	-87.1	N/A	N/A	N/A
Receive Sensitivity @ 14 MHz channel (dBm)	128 QAM	-73.5	N/A	-74.0	N/A	-73.5	-73.0	-72.5	-71.5
	64 QAM	-75.8	N/A	-76.3	N/A	-75.8	-75.3	-74.8	-73.8
	32 QAM	-77.8	N/A	-78.3	N/A	A	-77.3	-76.8	A
	16 QAM	-80.7	N/A	-81.2	N/A	-80.7	-80.2	-79.7	-78.7
	8PSK	A	A	A	N/A	A	A	A	A
	QPSK	-87.4	N/A	-87.9	N/A	-87.4	-86.9	-86.4	-85.4
Receive Sensitivity @ 13.75 MHz channel (dBm)	128 QAM	N/A	N/A	N/A	-74.0	N/A	N/A	N/A	N/A
	64 QAM	N/A	N/A	N/A	-76.4	N/A	N/A	N/A	N/A
	32 QAM	N/A	N/A	N/A	-78.4	N/A	N/A	N/A	N/A
	16 QAM	N/A	N/A	N/A	-81.3	N/A	N/A	N/A	N/A
	8PSK	N/A	N/A	N/A	A	N/A	N/A	N/A	N/A
	QPSK	N/A	N/A	N/A	-88.0	N/A	N/A	N/A	N/A
Receive Sensitivity @ 10 MHz channel (dBm)	128 QAM	-74.2	-74.6	N/A	-74.6	-74.1	N/A	N/A	-71.2
	64 QAM	-77.4	-77.9	N/A	-77.9	-77.4	N/A	N/A	-74.4
	32 QAM	-80.0	-79.9	N/A	-79.8	-79.4	N/A	N/A	-77.0
	16 QAM	-82.5	-82.8	N/A	-82.8	-82.3	N/A	N/A	-79.5
	8PSK	-85.1	-85.1	N/A	-85.1	-84.6	N/A	N/A	-82.1
	QPSK	-90.0	-89.5	N/A	-89.5	-89.0	N/A	N/A	-87.0
Receive Sensitivity @ 7 MHz channel (dBm)	128 QAM	-76.5	N/A	-77.0	-77.0	-76.5	-76.0	-75.5	-74.5
	64 QAM	-78.8	N/A	-79.3	-79.3	-78.8	-78.3	-77.8	-76.8
	32 QAM	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	16 QAM	-83.7	N/A	-84.2	-84.2	-83.7	-83.2	-82.7	-81.7
	8PSK	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	QPSK	-90.4	N/A	-90.9	-90.9	-90.4	-89.9	-89.4	-88.4

For more information, refer to the Cambium PTP 800 Series Brochure or visit cambiumnetworks.com.