

DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE UN RADIOENLACE DIGITAL PARA UN SERVICIO DE EMERGENCIA

Autor: Erik Carlos Collantes

Tutor: Lorenzo Rubio Arjona

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 2015-16

Valencia, 29 de junio de 2016

Agradecimientos

Con la realización de este trabajo se pone fin a un período muy importante de mi vida, cuatro años en los que me he enfrentado a una nueva forma de ver el mundo, han aparecido nuevas dificultades que, de no haber sido por las personas que me han ayudado diariamente, no hubieran sido posibles superar.

Este es el momento de agradecer a todas estas personas, empezando, como no puede ser de otra forma por mi familia, que desde que nací me han estado ayudado y enseñado a ser la persona que soy ahora. También agradecer a todos los amigos que han estado presentes a lo largo de mi vida, aunque por circunstancias con algunos se haya perdido el contacto, pero siempre están ahí por si se les necesita. Y para los que siguen ahí gracias por hacerme la vida más llevadera. También agradecer en este punto a mi novia Ainhoa, que ha estado apoyándome en los momentos más difíciles en los últimos años del grado y me ha ayudado a llegar hasta aquí. Finalmente agradecer a todos los profesores que he tenido a lo largo de mi vida de estudiante por todo lo que me han enseñado y por hacerme madurar y crecer como persona.

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado, se ha diseñado un radioenlace digital de emergencia entre el parque central de bomberos de Valencia y el centro de emergencias situado en la Eliana. Para ello en primer lugar se ha hecho un estudio de la orografía del terreno, posteriormente se han buscado en el mercado distintos equipos necesarios para la realización de enlace y se han elegido los parámetros de dichos equipos con el objetivo de conseguir un sistema con una alta disponibilidad y con una buena calidad en la comunicación, así como se han calculado los parámetros básicos del radioenlace necesarios para el cálculo de las diferentes atenuaciones, como puedan ser pérdidas por lluvia, por difracción, por absorción atmosférica, etc.

Una vez diseñado el radioenlace y calculado todos sus parámetros, el siguiente paso ha sido realizar su simulación para estudiar la viabilidad del sistema, para ello se ha hecho uso de una herramienta de simulación de radioenlaces llamada RadioSim.

Por último, una vez obtenidos los resultados de la simulación, se ha estudiado qué soluciones cumplían con los objetivos establecidos y se ha elegido para el diseño final de nuestro proyecto la solución más óptima en cuanto a disponibilidad y calidad del sistema.

Resum

En aquest Treball de Fi de Grau, s'ha dissenyat un radioenllaç digital d'emergència entre el parc central de bombers de València i el centre d'emergència de l'Eliana. En primer lloc s'ha realitzat un ampli estudi del terreny, posteriorment s'han buscat els equips necessaris per a la realització de l'enllaç i s'han configurat per tal d'aconseguir un sistema amb una alta disponibilitat y una bona qualitat en la comunicació, així com s'han calculat els paràmetres bàsics del radioenllaç, necessaris per al càlcul de les diferents atenuacions, tals com atenuació per pluja, per difracció, per absorció atmosfèrica, etc.

Una vegada dissenyat el radioenllaç i calculat tots els paràmetres necessaris, el següent pas ha sigut realitzar la simulació del sistema per tal de estudiar la seua viabilitat, per a la realització de dita simulació s'ha fet us d'una ferramenta de simulació de radioenllaços anomenada RadioSim.

Per a finalitzar, una vegada s'han obtingut els resultats de la simulació, s'ha estudiat quines solucions complien amb els objectius marcats i s'ha elegit per al disseny final del projecte la solució més òptima quant a disponibilitat i qualitat del sistema.

Abstract

In this dissertation, an emergency digital radiolink has been designed between the Central fire stations in Valencia and the Emergency centre in l'Eliana. Firstly, an orographical study of the terrain has been conducted. Secondly, the necessary equipments have been searched to perform the link; being their parameters chosen with the aim of obtaining a high availability, quality and fidelity system. The necessary basic parameters of the radiolink have been calculated to get the different fadings; for instance, losses due to rain, diffraction, atmospheric, absorption, etc.

Once the radiolink has been designed and all its parameters calculated, the next step has been its simulation to study the viability of the system. A radiolink simulation tool has been used, RadioSim.

Lastly, once the results of the simulation have been obtained, the optimal solution for the design of our project has been chosen according to availability and quality of the system from the solutions which accomplished the established aims.

Índice

Capítulo 1.	Introducción	4
1.1	Introducción	4
1.2	Objetivos del Trabajo de Fin de Grado	4
1.3	Metodología, plan de trabajo y organización de la memoria	5
1.3.1	Gestión del trabajo y distribución de las tareas	5
1.3.2	Diagrama temporal de las tareas	5
1.3.3	Estructura de la memoria.....	6
Capítulo 2.	Fundamentos teóricos.....	7
2.1	Radiocomunicación. Términos y definiciones fundamentales	7
2.2	Clasificación de los Radioenlaces	7
2.3	Estructura de un radioenlace	8
2.3.1	Elementos de Reserva	9
2.3.2	Sistemas de Supervisión.....	9
2.4	Gestión de las frecuencias radioeléctricas.....	9
2.5	Ventajas y desventajas de los radioenlaces	9
2.6	Parámetros de degradación del radioenlace	10
2.6.1	Pérdidas	10
2.6.1.1	Pérdidas por espacio libre.....	10
2.6.1.2	Pérdidas por difracción	10
2.6.1.3	Pérdidas por gases y vapores atmosféricos.....	12
2.6.1.4	Pérdidas por vegetación.....	13
2.6.1.5	Pérdidas por lluvia.....	15
2.6.2	Desvanecimientos.....	15
2.6.2.1	Clasificación de los desvanecimientos	16
2.6.3	Despolarización.....	16
2.6.4	Indisponibilidad de un Radioenlace	17
2.6.4.1	Indisponibilidad del equipo	17
2.6.4.2	Indisponibilidad de propagación	18
2.6.4.3	Objetivos de Indisponibilidad.....	18
2.6.5	Interferencias.....	18
2.6.5.1	Clases de interferencias	19
2.6.5.2	Relación portadora/Interferencia	20
2.7	Calidad de un radioenlace	20
2.8	Diversidad	21

2.8.1	Diversidad de espacio.....	22
2.8.2	Diversidad de frecuencia.....	22
2.8.3	Diversidad de trayecto.....	23
2.8.4	Diversidad de ángulo.....	23
2.8.5	Diversidad de polarización.....	23
2.8.6	Tratamiento de la señal en los sistemas de diversidad	23
2.8.6.1	Selección por conmutación.....	23
2.8.6.2	Selección por combinación.....	23
2.8.7	Mejora por diversidad	24
2.8.7.1	Factor de mejora para diversidad en espacio.....	24
2.8.7.2	Factor de mejora para diversidad de frecuencia	24
Capítulo 3.	RadioSim.....	25
3.1	Introducción a RadioSim.....	25
3.2	Funcionamiento de RadioSim	25
3.2.1	Gestión del perfil del radioenlace.....	27
3.2.2	Resultados	29
Capítulo 4.	Diseño del Radioenlace	30
4.1	Planteamiento del problema	30
4.2	Estudio de los vanos del radioenlace.....	30
4.3	Frecuencias de operación	32
4.4	Equipos de Transmisión	34
4.5	Antenas.....	34
4.6	Cable.....	35
4.7	Simulación del radioenlace con RadioSim	35
4.7.1	Diseño del primer vano	35
4.7.1.1	Parámetros de transmisión - recepción.....	36
4.7.1.2	Parámetros básicos del radioenlace	36
4.7.1.3	Resultados de la simulación del vano 1.....	37
4.7.2	Diseño del segundo vano	40
4.7.2.1	Parámetros de transmisión - recepción.....	40
4.7.2.2	Parámetros básicos del radioenlace	41
4.7.2.3	Resultados de la simulación del vano 2.....	41
4.7.3	Diseño del tercer vano	43
4.7.3.1	Parámetros de transmisión - recepción.....	43
4.7.3.2	Parámetros básicos del radioenlace	44
4.7.3.3	Resultados de la simulación del vano 3.....	44
4.8	Solución aportada	46

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras	48
5.1 Conclusiones	48
5.2 Líneas futuras	48
Referencias bibliográficas	49

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

Los radioenlaces de microondas permiten la transmisión económica, eficiente y simultánea de grandes volúmenes de información sin importar su naturaleza (vídeo, audio o datos), en condiciones que muchas veces son adversas para los medios cableados. Los radioenlaces de microondas comúnmente son utilizados como medios de transmisión de larga distancia y alta capacidad punto a punto en las redes de telecomunicaciones, pero gracias a los últimos adelantos que se han suscitado en técnicas digitales, también pueden ser utilizados para enlazar terminales en una misma ciudad de manera eficiente y con una gran capacidad de transmisión. No obstante, el diseño de radioenlaces es complejo, es necesario realizar un estudio bien detallado de las condiciones de la trayectoria del enlace, condiciones atmosféricas y climáticas, perfil topográfico, etc. En base a estas variables se deben considerar los diferentes tipos de desvanecimiento, así como también es necesario considerar las diversas atenuaciones que puede sufrir la señal como pueden ser las pérdidas por propagación en espacio libre, atenuación por difracción, atenuación de los alimentadores en transmisión y recepción, atenuación de absorción entre otras.

Al haber tantos efectos a considerar en el diseño de un radioenlace, necesitamos alguna herramienta de simulación que nos facilite la tarea, en este Trabajo de Fin de Grado se ha hecho uso de una herramienta sencilla que permite obtener los parámetros básicos necesarios para el diseño de nuestro radioenlace de emergencia.

1.2 Objetivos del Trabajo de Fin de Grado

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es estudiar los parámetros más importantes a diseñar en un radioenlace para realizar una comunicación óptima y asegurar una plena disponibilidad y una alta calidad en la comunicación, así como una correcta elección de los equipos de transmisión y demás componentes necesarios para la realización del enlace, ya que a diferencia de otros programas de simulación de radioenlaces, el programa que se utilizará en este trabajo dispone de una gran versatilidad para elegir los equipos que se desee y solo bastará con introducir sus parámetros en el programa para realizar la simulación.

En este trabajo se propondrá un posible radioenlace de emergencias entre un parque de bomberos y un centro de emergencia, en el cual se deberá realizar un estudio de la orografía del terreno, calcular los parámetros básicos del radioenlace necesario para el cálculo de las atenuaciones y configurar los equipos de manera que se consiga cumplir con los objetivos de calidad y disponibilidad establecidos.

1.3 Metodología, plan de trabajo y organización de la memoria

1.3.1 Gestión del trabajo y distribución de las tareas

Con el fin de cumplir los objetivos planteados en este trabajo, las tareas que se han seguido para su realización han sido las siguientes:

1. Búsqueda bibliográfica sobre el diseño de radioenlaces digitales.
2. Familiarización con la interfaz gráfica de usuario de Matlab, Guide.
3. Manejo y mejoras de la herramienta RadioSim.
4. Planteamiento del Radioenlace de emergencia.
5. Búsqueda de información topográfica y confección de perfiles del radioenlace.
6. Búsqueda y elección de los equipos para el radioenlace.
7. Estudio y cálculo de los parámetros del radioenlace.
8. Simulaciones del radioenlace con la herramienta RadioSim.
9. Obtención y evaluación de los resultados obtenidos con el programa.
10. Redacción de la memoria.
11. Preparación de la presentación del trabajo.

1.3.2 Diagrama temporal de las tareas

A continuación se muestra un diagrama temporal de las tareas explicadas en el apartado 1.3.1.

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
1	■	■					
2	■	■					
3		■					
4		■					
5			■				
6				■			
7				■	■		
8				■	■		
9					■	■	
10					■	■	
11						■	■

Figura 1.1 Distribución temporal de las tareas

1.3.3 Estructura de la memoria

La memoria de este Trabajo de Fin de Grado se divide en 5 capítulos. En el actual capítulo se ha explicado la estructura de trabajo llevada a cabo y se ha introducido el tema del trabajo.

En el segundo capítulo, se introduce el concepto de radioenlace y se explican sus conceptos teóricos básicos, así como los principales parámetros que afectan a las prestaciones de éste en cuanto a calidad y viabilidad del sistema.

En el tercer capítulo se presenta la herramienta con la que se va a realizar las simulaciones del radioenlace y se explica su funcionamiento.

En el cuarto capítulo, se procede a explicar el diseño del radioenlace, que equipos se han elegido, que antenas, cual ha sido la distribución de los vanos, con que banda de frecuencias se va a trabajar, así como se explica el proceso que se ha seguido para el cálculo de los parámetros básicos del radioenlace necesarios para realizar las simulaciones. Finalmente se obtienen los resultados de las simulaciones y se elige la solución más óptima.

En el quinto capítulo, se finaliza la memoria con una conclusión y se proponen unas posibles líneas futuras a este proyecto.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos.

2.1 Radiocomunicación. Términos y definiciones fundamentales

La radiocomunicación se puede definir como la Telecomunicación realizada por medio ondas radioeléctricas que se propagan por el canal radio. Las ondas radioeléctricas se definen como las ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin guía artificial y cuyo límite superior de frecuencia se fija, convencionalmente en 3.000 GHz.

Se conoce como radioenlace a cualquier interconexión entre terminales de telecomunicación efectuada por ondas electromagnéticas, específicamente por aquellas que entran en el rango de las señales de radio. Los radioenlaces, establecen un concepto de comunicación del tipo dúplex, de donde se deben transmitir dos portadoras moduladas: una para la transmisión y otra para la recepción. Al par de frecuencias asignadas para la transmisión y recepción de las señales, se lo denomina radio canal.

2.2 Clasificación de los Radioenlaces

- Según el tipo de señal que transmiten, los radioenlaces pueden ser:
 - 1) Radioenlaces analógicos: fueron los primeros y tenían la finalidad de transmisión de canales telefónicos y de televisión. Permiten la transmisión de miles de canales de voz empleando técnicas convencionales de modulación FM y multicanalización por división de frecuencia. Actualmente están en desuso.
 - 2) Radioenlaces digitales: permiten la transmisión simultánea de cientos o miles de canales digitales de voz, vídeo y datos, los cuales son multicanalizados empleando técnicas de división en el tiempo (TDM). También permite una regeneración de la señal, mayor tolerancia al ruido e interferencias así como un incremento considerable de la capacidad con respecto a los radioenlaces analógicos.
- Según sean sus terminales:
 - 3) Radioenlaces de servicio fijo: sistemas de comunicaciones entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre, que proporcionan una capacidad de información, con características de calidad y disponibilidad determinadas. Típicamente estos enlaces se explotan entre los 800 MHz y 42 GHz.
 - 4) Radioenlaces de servicio móvil: como el nombre lo indica, son aquellos en la que los terminales son móviles.
- Por la situación de los terminales pueden ser:
 - 1) Todos en la tierra: radioenlaces terrenales.
 - 2) Uno o más repetidores en el satélite: radioenlace espacial o por satélite.

2.3 Estructura de un radioenlace

Un radioenlace está constituido por estaciones terminales y estaciones repetidoras intermedias, con sus equipos transeceptores (transmisores – receptores), antena y elementos de supervisión y control. En los radioenlaces, además de las estaciones repetidoras típicas, también se suelen ver estaciones nodales, donde se demodula la señal y se gestionan los canales que se transmiten. Al tramo estación terminal-estación nodal se le denomina sección de conmutación y permite el control, protección y supervisión de la información emitida [1].

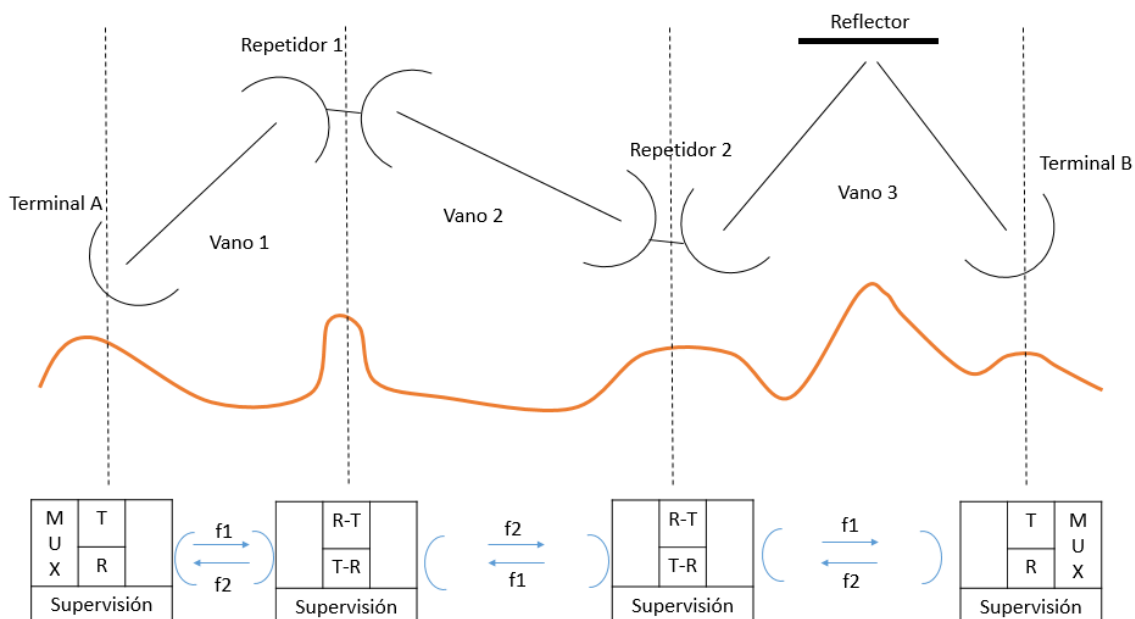


Figura 2.1 Representación esquemática de un radioenlace

En la Figura 2.1 se muestra la planta y el perfil topográfico de un enlace junto con un esquema de bloques representativo de la estructura del radioenlace y de la terminología que se utiliza. Como se observa en la figura, los radioenlaces son sistemas de comunicación “en serie”, por lo que cualquier desvanecimiento o avería cortaría la comunicación. Por ello en radioenlaces en los que se debe disponer de una alta disponibilidad, como son los radioenlaces de emergencia como el que se diseñará en este trabajo de fin de grado, debe estar dotado de un buen sistema de redundancia de equipos para mantener la continuidad frente a posibles averías y junto con un uso adecuado de técnicas de diversidad como contramedida frente a los desvanecimientos.

En un radioenlace, el transmisor radia una señal que es modulada y transportada por una portadora a una frecuencia determinada, la cual identifica el tipo de comunicación. Dicha señal se transmite gracias a una antena transmisora y se propaga por el medio, en este caso, el canal radio. La señal captada es filtrada, posteriormente un bloque RF/FI pasará la señal de la frecuencia a la que fue emitida a una frecuencia intermedia a la que trabajan los equipos de recepción, finalmente la señal será demodulada y tratada con el fin de obtener la señal esperada.

2.3.1 Elementos de Reserva

Con objeto de lograr la fiabilidad necesaria en un sistema de radioenlaces y permitir las operaciones de conservación es necesario disponer de equipos de protección o reserva que entren en servicio en caso de fallo del enlace operativo. En general, un radioenlace que disponga de M radiocanales activos y N de reserva se designa por <<M+N>> [1].

2.3.2 Sistemas de Supervisión

Todo radioenlace debe disponer de un sistema de supervisión con el fin de obtener la máxima información posible acerca del estado del radioenlace en un momento determinado y facilitar las operaciones de mantenimiento [1].

2.4 Gestión de las frecuencias radioeléctricas

Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética.

El espectro radioeléctrico es la porción o subconjunto del espectro electromagnético que se distingue por sus posibilidades para las radiocomunicaciones, es decir, para la transmisión de información por medios no guiados, el espectro utilizado para radiocomunicaciones va desde la banda de Low Frequency (LF, 30-300 kHz) hasta la banda Extremely High Frequency (EHF, 30-300 GHz) aunque convencionalmente se fija el límite superior del espectro en 3000 GHz. En los radioenlaces, se utiliza la banda de microondas, que se extiende de los 300 MHz hasta los 300 GHz.

2.5 Ventajas y desventajas de los radioenlaces

Entre las principales ventajas que tiene el uso de radioenlaces respecto a otros métodos de comunicación podemos destacar:

- Un bajo coste de instalación.
- Una instalación rápida y sencilla comparada con una comunicación con cable.
- Supera irregularidades del terreno, es decir, mucho más flexible y escalable.
- Tiene un gran ancho de banda.
- Los fallos que se pueden tener en el radioenlace son fácilmente identificables ya que solo pueden darse en el transmisor, receptor o repetidor.
- Al utilizar longitudes de onda cortas (alta frecuencia), las antenas son relativamente pequeñas.

Como principales desventajas podemos considerar las siguientes:

- Explotación restringida a tramos con visibilidad directa para los enlaces.
- Necesidad de alimentar a los equipos en zonas donde es posible un difícil despliegue de una red eléctrica, en este caso se utilizan baterías autónomas como pueden ser paneles solares.
- Al tratarse de ondas, las condiciones atmosféricas, así como los fenómenos físicos pueden ocasionar interferencias, por lo que se utilizan sistemas y equipos auxiliares.
- Por su estructura en serie, si un terminal falla, se cae toda la red, por lo que es necesario el uso de sistemas de supervisión y control.
- La segregación de canales no es tan sencilla como puede ser en la fibra óptica utilizando multiplicación por división de longitud de onda (WDM).

2.6 Parámetros de degradación del radioenlace

A continuación se va a explicar los parámetros principales a tener en cuenta a la hora del diseño del radioenlace, tales como pérdidas, interferencias, desvanecimientos, etc.

2.6.1 Pérdidas

2.6.1.1 Pérdidas por espacio libre

Para muchos fines la pérdida en la trayectoria por encima de los 10 GHz se puede considerar como pérdida de espacio libre. Se define como la pérdida que produce una onda electromagnética cuando se propaga en el espacio vacío, aumentan directamente con la distancia y la frecuencia. Siguiendo la Rec. UIT-R P.525-2[2], las pérdidas por espacio libre se pueden calcular a través de varias fórmulas, en función de la longitud de onda o en función de la frecuencia:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.1)$$

donde:

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

d : distancia(m)

λ : longitud de onda (m)

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \quad (\text{dB}) \quad (2.2)$$

donde:

f : frecuencia (MHz)

d : distancia (km)

2.6.1.2 Pérdidas por difracción

La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda incide sobre un obstáculo. La zona oculta a la antena transmisora se denomina “zona de difracción” o “zona de penumbra radioeléctrica”, en esta zona los campos son nulos, si bien presentan atenuaciones superiores a las del espacio libre.

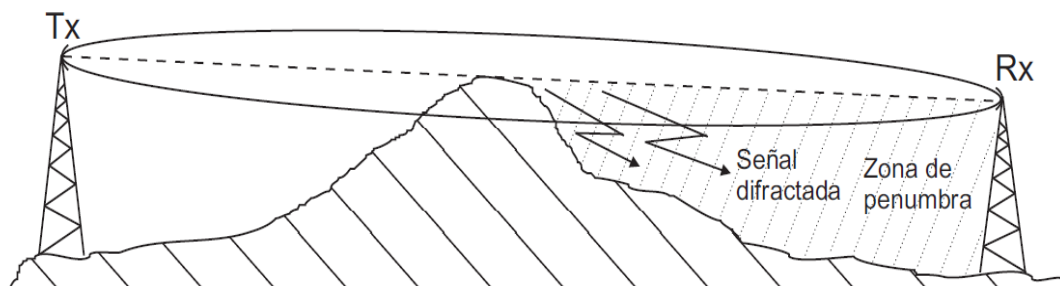


Figura 2.2. Difracción en un vano [3]

El fenómeno de difracción se analiza utilizando el principio de Huygens – Fresnel, en el cual se enuncia que un frente de ondas puede considerarse como un conjunto de fuentes esféricas puntuales que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad y frecuencia. Esto permite explicar el fenómeno de difracción pues, frente a un obstáculo y considerando el frente

de ondas como un conjunto de fuentes puntuales esféricas, parte del frente de ondas se propaga en una dirección diferente a la que llevaba el frente de ondas inicialmente.

En las radiocomunicaciones dicho fenómeno es importante si el obstáculo se encuentra dentro de lo que se denomina elipsoide de Fresnel. Más precisamente, se considera que no hay obstáculo, es decir, hay espacio libre, cuando éste se encuentra fuera de la zona delimitada por el 60% de la primera zona de Fresnel, elipse de radio [4]:

$$R1 = \sqrt{\left(\lambda \frac{d1d2}{d1+d2}\right)} \quad (m) \quad (2.3)$$

donde:

d1: distancia entre transmisor y obstáculo (m)

d2: distancia entre receptor y obstáculo (m)

λ : longitud de onda de emisión (m)

La forma del obstáculo también se tiene en cuenta, dependiendo de si se trata de un obstáculo agudo o redondeado, las pérdidas por difracción varían. El cálculo de las pérdidas por difracción se resuelve utilizando las integrales de Fresnel. Se pueden encontrar aproximaciones de los desarrollos en serie de dichas integrales en la Recomendación UIT-R P.526-13[4].

En la siguiente gráfica se puede observar las pérdidas por difracción debido a un obstáculo agudo:

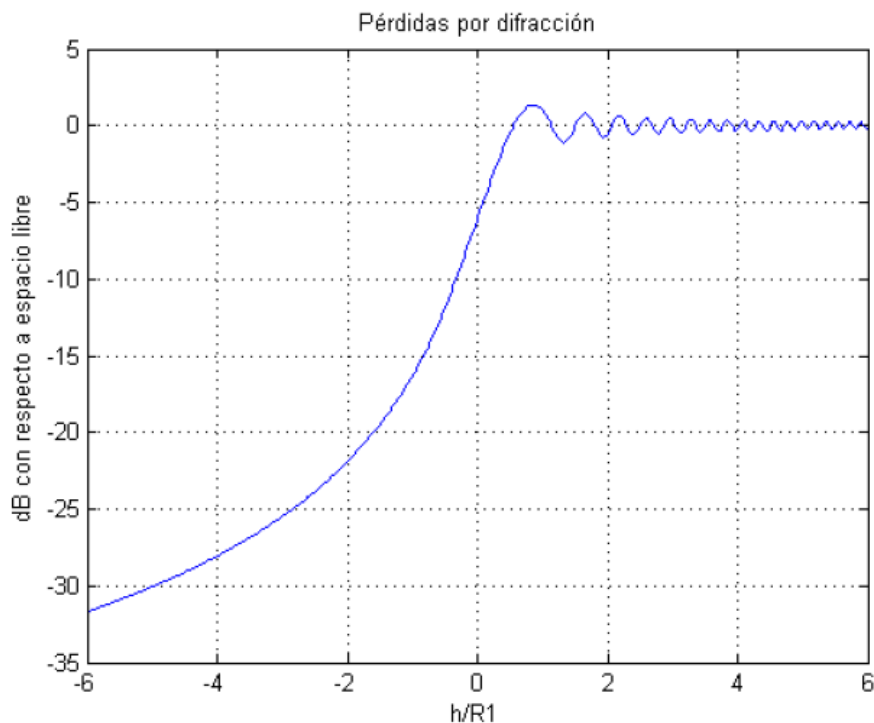


Figura 2.3. Pérdidas por difracción en un obstáculo agudo

Como se puede observar, si h/R_1 es negativo, significa que el obstáculo se interpone a la línea de visión entre transmisor y receptor un valor de h metros. Esto implicaría unas pérdidas considerables que afectarían a las prestaciones del enlace. Por otro lado, cabe incluso la posibilidad de que si el obstáculo está por debajo de la línea de visión (h/R_1 positivo) se produjera una ganancia por difracción.

2.6.1.3 Pérdidas por gases y vapores atmosféricos.

En trayectos troposféricos las moléculas de O₂ y H₂O absorben energía electromagnéticamente, produciendo una atenuación que puede ser muy elevada en ciertas frecuencias. Esta atenuación adicional sólo tiene importancia en frecuencias superiores a 10 GHz. En trayectos poco inclinados, próximos al suelo, la atenuación debida a estos efectos se calculan de la siguiente manera [1]:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w)r_0 \quad (\text{dB}) \quad (2.4)$$

Donde r_0 es la longitud del trayecto (km), γ es la atenuación específica (dB/km), γ_o es la atenuación específica para el oxígeno y γ_w es la atenuación específica para el vapor de agua.

La recomendación ITU-R P.676 [5] proporciona expresiones para el cálculo de las distintas atenuaciones, cuyos comportamientos se pueden observar en la figura 2.4.

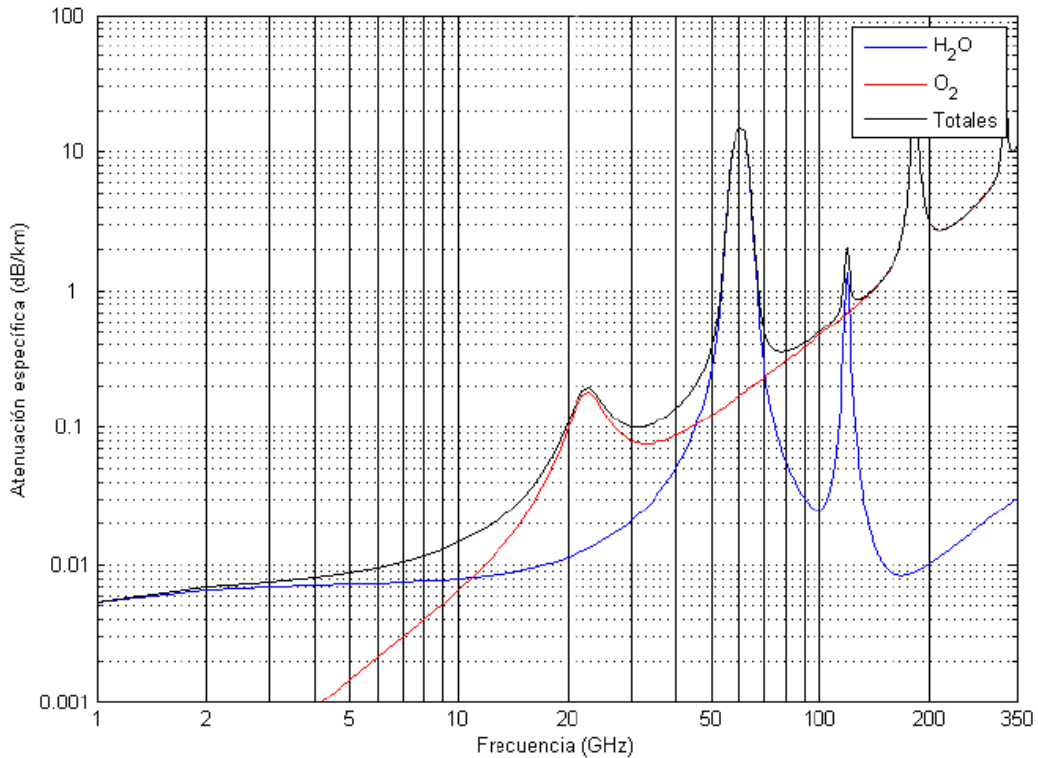


Figura 2.4. Atenuación específica debido a los gases para 1013 hPa, 15 °C y 7.5 g/m³ [5]

En la Figura 2.4 se observa que tanto el O₂ como el H₂O presentan crestas de elevada atenuación que corresponden a las frecuencias de resonancia molecular. Entre estas crestas aparecen ventanas espectrales dentro de las cuales se utilizan las frecuencias en los radioenlaces del servicio fijo. Esta absorción por tanto dependen de la frecuencia a la que se esté emitiendo la señal, produciendo que en ciertas bandas de frecuencia sea imposible la transmisión a largas distancias, aunque es cierto que cuando se desea realizar una radiocomunicación local, de corto alcance, puede efectuarse en las frecuencias de las crestas de atenuación, a fin de evitar que la señal se propague lejos y pueda causar interferencias.

2.6.1.4 Pérdidas por Vegetación

Cuando un radioenlace atraviesa un terreno boscoso, hay una pérdida adicional por penetración de las ondas a través de la vegetación.

Si el transmisor está fuera del bosque y el receptor se encuentra a una distancia “d” desde el extremo del bosque, la atenuación en exceso debida a vegetación es [6]:

$$A_{ev} = A_m[1 - \exp(-d\gamma/A_m)] \quad (2.5)$$

siendo:

d : longitud del trayecto dentro de la zona boscosa (m)

γ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

A_m : atenuación máxima cuando un terminal está dentro de una zona de vegetación de un tipo y profundidad específicos (dB).

La expresión (2.5) no se aplica cuando tanto transmisor como receptor están en zonas no arboladas, pero hay una zona de vegetación interpuesta en el trayecto, en estos casos y para frecuencias inferiores a 1 GHz, la pérdida por vegetación se evalúa como:

$$A_{et} = d\gamma \quad (2.6)$$

donde:

d : longitud del trayecto a través de la copa del árbol (m).

γ : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m).

$A_{et} \leq$ exceso de atenuación más bajo para otros trayectos (dB).

En la Figura 2.5 se muestran valores típicos de atenuación específica obtenidos a partir de diferentes mediciones en la gama de frecuencias que va de 30 MHz a 30 GHz aproximadamente en zona boscosa. Por debajo de 1 GHz las señales polarizadas verticalmente tienen tendencia a experimentar una atenuación superior a la que experimentan las polarizadas horizontalmente, aunque esto se debe a la dispersión causada por los troncos de los árboles [6].

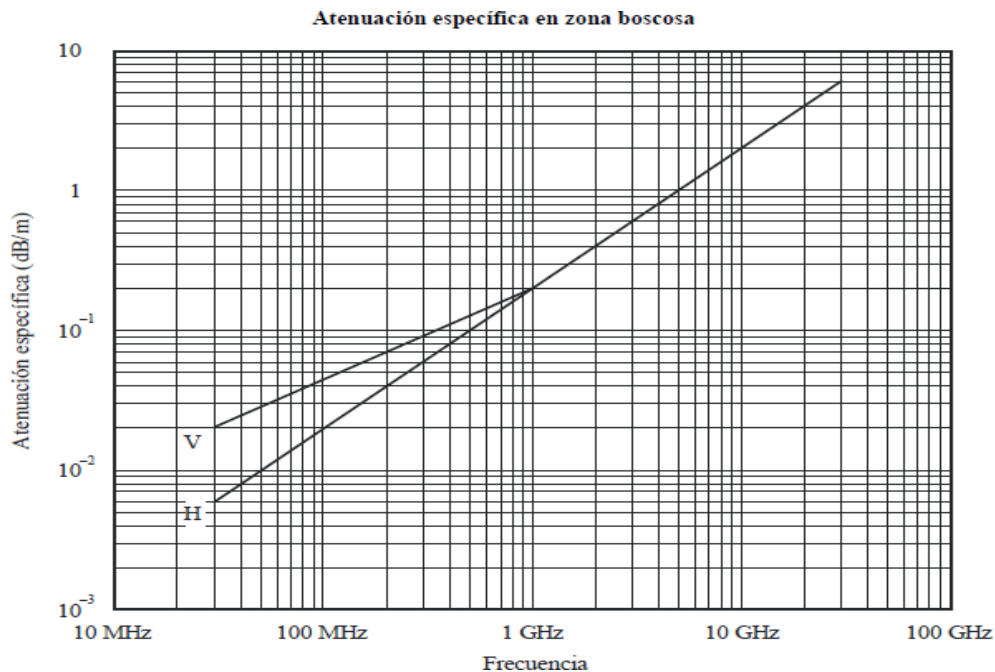


Figura 2.5. Atenuación específica en zona boscosa [6]

2.6.1.5 Pérdidas por lluvia

En los radioenlaces troposféricos y por satélite, existe también atenuación debida a la absorción y dispersión por hidrometeoros (lluvia, nieve y granizo). Esta atenuación se puede considerar importante a partir de 6 GHz. La Recomendación UIT-R P.530-16[7], establece un procedimiento para evaluar la atenuación por lluvia rebasada durante un porcentaje de tiempo igual al p%, para calcular la atenuación de lluvia a largo plazo se siguen los siguientes pasos [7]:

1. Se obtiene la intensidad de precipitación $R_{0,01}$ superada durante el 0,01% del tiempo, si no se conoce este dato, se puede estimar a partir de la Recomendación UIT-R P.837[8].
2. Se calcula la atenuación específica, γ_R (dB/km) según la Recomendación UIT-R P.838[9] de la siguiente manera:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (2.7)$$

donde R es la intensidad de lluvia (mm/h) y k y α son constantes que dependen de la frecuencia y sus valores vienen detallados en la Recomendación UIT-R P.838 [9]:

Frecuencia (GHz)	K_H	K_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.88
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.00065	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.31
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.2
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.03
30	0.187	0.167	1.021	1
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.35	0.31	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793

Tabla 2.1. Coeficientes para estimar el valor de la atenuación específica [9]

3. Se calcula la longitud efectiva (la cual hay que considerar para las pérdidas por hidrometeoros) que es el producto de la longitud real del enlace en km d y una constante r cuya expresión es la siguiente:

$$r = \frac{1}{0,447d^{0,633}R_{0,01}^{0,073\alpha}f^{0,123}-10,579(1-\exp(-0,024d))} \quad (2.8)$$

4. Una estimación de la atenuación del trayecto excedida durante el 0,01% del tiempo viene dada por:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{\text{eff}} = \gamma_R dr \quad (\text{dB}) \quad (2.9)$$

5. La atenuación excedida durante otros porcentajes de tiempo p en el margen de 0,001% a 1% puede deducirse de la siguiente manera [7]:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 p^{-(C_2+C_3 \log p)} \quad (2.10)$$

donde:

$$C_1 = (0,07^{C_0})[0,12^{(1-C_0)}] \quad (2.10.a)$$

$$C_2 = 0.855C_0 + 0.546(1 - C_0) \quad (2.10.b)$$

$$C_3 = 0.139C_0 + 0.043(1 - C_0) \quad (2.10.c)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0,12 + 0,4 \left[\log\left(\frac{f}{10}\right)^{0,8} \right] & f \geq 10\text{GHz} \\ 0,12 & f < 10\text{GHz} \end{cases} \quad (2.10.d)$$

2.6.2 Desvanecimientos

Se conoce como desvanecimiento a toda disminución de la potencia recibida de señal con relación a su valor nominal. La diferencia entre este nivel nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimiento se llama profundidad de desvanecimiento y se expresa en dB, mientras que al intervalo de tiempo que media entre la disminución y la recuperación del nivel nominal se le llama duración del desvanecimiento.

Para valorar la influencia de este aspecto en las características del radioenlace, se utilizarán los métodos explicados para el cálculo de la probabilidad de desvanecimiento en la Rec. UIT-R P.530-16 [7]. La probabilidad de desvanecimiento viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_f = P_0 10^{-F/10} \quad (2.11)$$

donde:

P_0 : factor de ocurrencia de desvanecimiento

F : profundidad de desvanecimiento

2.6.2.1 Clasificación de los desvanecimientos

En la tabla 2.2 se han dispuesto las distintas clases de desvanecimientos en dos columnas según el tipo de desvanecimiento:

Característica	Tipo de desvanecimiento	
Profundidad	Profundo	Muy profundo
Duración	Lento	Rápido
Causa	Factor K	Multitrayecto
Distribución	Gaussiano	Rayleigh/Rice
Frecuencia	Continuado	Puntual
Espectro	Plano	Selectivo

Tabla 2.2 Tipos de desvanecimiento según su característica [1]

2.6.3 Despolarización

La lluvia, además de atenuar la señal, produce un efecto de despolarización sobre la misma, que se traduce en una degradación de la discriminación por polarización cruzada (XPD), esto puede provocar un aumento de la interferencia cocanal y, en menor medida, interferencia de canal adyacente.

Según la Recomendación UIT-R P.530-16[7], la distribución de la XPD se puede estimar a partir de la distribución de la atenuación copolar (CPA) por lluvia, mediante la siguiente relación:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \text{ (dB)} \quad (2.12)$$

Los coeficientes U y $V(f)$ dependen, en general, de cierto número de variables y parámetros empíricos, incluida la frecuencia f . Para trayectos de visibilidad directa con pequeños ángulos de elevación y polarización horizontal o vertical, pueden darse a tales coeficientes los valores aproximados siguientes [7]:

$$U = U_0 + 30 \log f \quad (2.12.a)$$

$$V(f) = 12,8 f^{0,19} \quad \text{para } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \quad (2.12.b)$$

$$V(f) = 22,6 \quad \text{para } 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \quad (2.12.c)$$

donde por término medio $U_0 = 15$ dB.

Las estadísticas de XPD correspondientes a un largo periodo, obtenidas en una frecuencia, pueden extrapolarse a otra utilizando la fórmula semiempírica [7]:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad \text{para } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (2.13)$$

donde XPD_1 y XPD_2 son los valores de XPD no rebasados durante el mismo porcentaje de tiempo a las frecuencias f_1 y f_2 .

2.6.4 Indisponibilidad de un Radioenlace

La indisponibilidad se describe en términos de interrupciones o de una degradación muy intensa de la señal que, aunque mantenga la continuidad radioeléctrica, supone un corte del servicio, por tanto se define como interrupción, un periodo de tiempo en el que [1]:

- Se produce un corte parcial o total de la señal.
- Aparece ruido o una BER de valor excesivo.
- Surge una fuente discontinuidad en la señal.
- Aparece una intensa distorsión en la señal.

Estas interrupciones pueden darse en diferentes situaciones:

- Fallos en equipos de conmutación, fuentes de alimentación, sistemas radiantes, etc. Suelen ser interrupciones de horas hasta que se repara el problema.
- Condiciones anómalas de propagación o meteorológicas adversas como puede ser la presencia de lluvia, provocando interrupciones largas.
- Interferencias internas o externas.

Como el radioenlace es un sistema de comunicación dúplex, la indisponibilidad debe referirse a los trayectos de ida y vuelta, expresándose así [1]:

$$U(\%) = \frac{T_1+T_2-T_{12}}{T} \cdot 100 \quad (2.14)$$

Donde T1 es el tiempo de interrupción en el sentido de ida, T2 es el tiempo de interrupción en el sentido de vuelta, T12 es el tiempo de interrupción en ambos sentidos simultáneamente y T es el tiempo de observación.

La indisponibilidad total de una ruta de longitud L, U(L), de un radioenlace se calcula como la suma de la indisponibilidad debida a los fallos de equipos Ue(N) y indisponibilidad debida a la propagación Up(V) [1]:

$$U(L) = U_e(N) + U_p(V) \quad (2.15)$$

2.6.4.1 Indisponibilidad del equipo

Para establecer la indisponibilidad del equipo es necesario introducir el concepto de tiempo medio de reparación MTTR (*Mean Time To Repair*) y tiempo medio entre fallos, MTBF (*Mean Time Between Failures*). Así, la indisponibilidad del equipo viene dada por la siguiente expresión [1]:

$$U_e = \frac{MTTR}{MTBF+MTTR} 100(\%) \quad (2.16)$$

Para frecuencias inferiores a 7 GHz la indisponibilidad total puede aproximarse por la indisponibilidad debida a equipos ya que la indisponibilidad por propagación es provocada por la lluvia, y a frecuencias inferiores a 7 GHz ésta última no se considera en los cálculos de pérdidas e indisponibilidad [1].

2.6.4.2 Indisponibilidad de propagación

El cálculo de la indisponibilidad debida a propagación es algo más laborioso. En la ecuación (2.10) ya se vio cómo calcular las pérdidas por lluvia excedida en un porcentaje cualquiera p comprendido entre 0.001% y 1% conociendo las pérdidas para $p = 0.01\%$. Ahora se busca el porcentaje de lluvia excedida p tal que esas pérdidas sean iguales al Margen de Fading, margen de potencia entre la potencia media que se obtiene en recepción y el umbral de recepción mínimo. Por lo tanto modificando la expresión (2.10) y despejando p se obtiene la expresión para la indisponibilidad por propagación:

$$U_p = p = 10^{\log(p)} (\%) \quad (2.17)$$

2.6.4.3 Objetivos de indisponibilidad

El radioenlace tendrá una potencia recibida que se calcula añadiéndole a la potencia transmitida la ganancia en transmisión, en recepción, y todas las posibles pérdidas. El receptor tiene una potencia umbral, una sensibilidad que delimita el límite entre la potencia de señal tratable y la imposible de tratar. Cuando la potencia recibida cae por debajo de ese umbral, tenemos una indisponibilidad

La Recomendación UIT-R F.1703-0[10] establece unos métodos el cálculo de los objetivos de indisponibilidad para enlaces digitales, usando de referencia los parámetros de error mostrados en la Recomendación UIT-R F.1668-1[11].

Objetivos de indisponibilidad para un tramo nacional	Objetivos para el tramo de acceso (menor que 50 km)	Objetivos para el tramo de corto alcance (50-250 km)	Objetivos para el tramo de largo alcance (250-2500 km)
Relación de indisponibilidad	0.05 %	0.04 %	0.12 %
Intensidad de interrupciones al año	100	120	93

Tabla 2.3 Objetivos de indisponibilidad para tramo nacional [10]

Donde la relación de indisponibilidad es la proporción de tiempo durante el cual un trayecto de extremo a extremo se encuentra en estado indisponible durante un periodo de observación. Se calcula dividiendo el tiempo indisponible total durante el periodo de observación por la duración del propio periodo de observación. Se recomienda que el periodo de observación sea de 1 año [10].

2.6.5 Interferencias

Cuando se planifica un radioenlace es importante identificar posibles interferencias que podrían degradar la calidad del sistema. Éstas pueden provenir de otros sistemas ya instalados o del propio sistema.

2.6.5.1 Clases de interferencias

Se pueden realizar 3 clasificaciones de las interferencias de RF[13]:

1. En primer lugar, atendiendo a su generación, se puede distinguir entre interferencia intrasistema o intersistema, dependiendo de si las interferencias son efectuadas por el propio sistema o por otros sistemas.
2. La segunda clasificación que se puede hacer de las interferencias, es según la posición relativa de la señal interferente respecto de la deseada y se pueden distinguir dos casos: Interferencia en el mismo canal o cocanal e interferencia en un canal adyacente.
3. La tercera clasificación que puede establecerse atendiendo a las circunstancias de propagación de las señales deseada e interferente, como se indica en la tabla 2.4 asociada a la figura 2.6 donde se resumen las fuentes de interferencia más importantes que pueden afectar a un sistema de radioenlaces terrenales.

Referencia en Fig. 2.8	Grupo A	Referencia en Fig.2.8	Grupo B
1	Cocanal, canales de polarización cruzada	3	Recepción delante/atrás
2	Radiación hacia atrás	5	Rebasamiento opuesto(3 tramos)
4	Rebasamiento (3 tramos)	6	Reflexiones no deseadas
7	Canal adyacente copolarizado	D	Otros sistemas digitales
8	Radiación hacia atrás y rebasamiento	A	Otros sistemas analógicos
		S	Sistemas por satélite

Tabla 2.4 Fuentes de interferencia en un radioenlace [13]

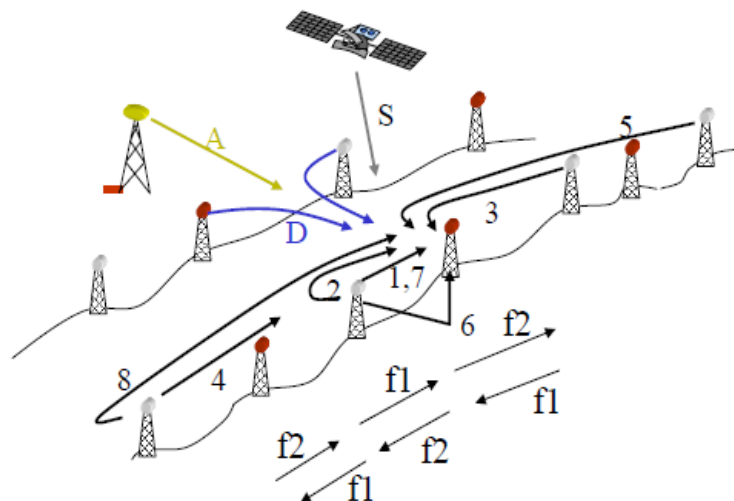


Figura 2.6 Representación de las fuentes de interferencia en un radioenlace [13]

2.6.5.2 Relación portadora/interferencia

La interferencia en un radioenlace se evalúa mediante la relación portadora/Interferencia C/I(dB).

$$\text{CIR} = W_{t,S} + G_{T,S} - L_{\text{bas},S} - W_{t,I} - G_{T,I} + L_{\text{bas},I} + L_{\text{diag}} + L_{\text{pol}} \quad (2.18)$$

Donde $W_{t,S}$ es la potencia del transmisor deseado en dBm, $W_{t,I}$ es la potencia del transmisor interferente en dBm, $G_{T,S}$ es la ganancia de la antena transmisora deseada en dB, $G_{T,I}$ la ganancia de la antena transmisora interferente en dB, $L_{\text{bas},S}$ son las pérdidas básicas de propagación en dB para la señal deseada, $L_{\text{bas},I}$ son las pérdidas básicas de propagación para la señal interferente en dB, L_{diag} es la atenuación en dB de la señal interferente por los diagramas de radiación de las antenas transmisora y receptora y L_{pol} es la atenuación en dB que introduce la antena receptora sobre la interferente en términos de polarización.

2.7 Calidad de un radioenlace

La calidad de un radioenlace representa el grado para el que ese sistema está en condiciones de proporcionar el servicio para el que se ha diseñado. Por ello se distingue entre dos aspectos de calidad complementarios y relacionados entre sí [1]:

- Calidad en cuanto a disponibilidad.
- Calidad en cuanto a fidelidad.

Se entiende por disponibilidad de un equipo o sistema su aptitud para desempeñar la función para el que ha sido proyectado, se cuantifica por la probabilidad de que el sistema se encuentre en condiciones de funcionamiento en un momento dado. Encontrándose el radioenlace en condiciones de disponibilidad pueden producirse macro interrupciones y degradaciones que producen errores en los bits transmitidos y afectan a la nitidez o claridad de la señal recibida, es decir a su fidelidad. En consecuencia, la calidad de fidelidad se expresa en términos de la característica de error, que es un porcentaje determinado de bits erróneos [1].

En el cálculo de la calidad de radioenlaces, uno de los parámetros más importantes a evaluar es la relación portadora/ruido:

$$\frac{C}{N} = 10 \log \left(\frac{P_r}{k T_0 f_r b_t} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2.19)$$

donde:

- Pr: Potencia recibida (W)
- k: Constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K))
- To: Temperatura ambiente (290 K)
- fr: Factor de ruido en recepción
- bt: Ancho de banda de transmisión (Hz)

En algunos radioenlaces digitales se utiliza la relación E_b/N_0 entre la energía de bit y la densidad espectral de ruido. Se calcula fácilmente restándole a la relación señal a ruido $10\log(v_{bin}/bt)$ dónde v_{bin} es la velocidad binaria útil. Tanto la relación portadora a ruido como la relación energía de bit a densidad espectral de ruido determinan la probabilidad de error de bit (Bit Error Rate, BER) en función de la modulación que utilizemos. La BER es un parámetro muy importante que caracteriza la calidad del enlace.

A continuación se muestra una gráfica conteniendo la relación entre la BER y la relación E_b/N_0 de las modulaciones digitales más utilizadas:

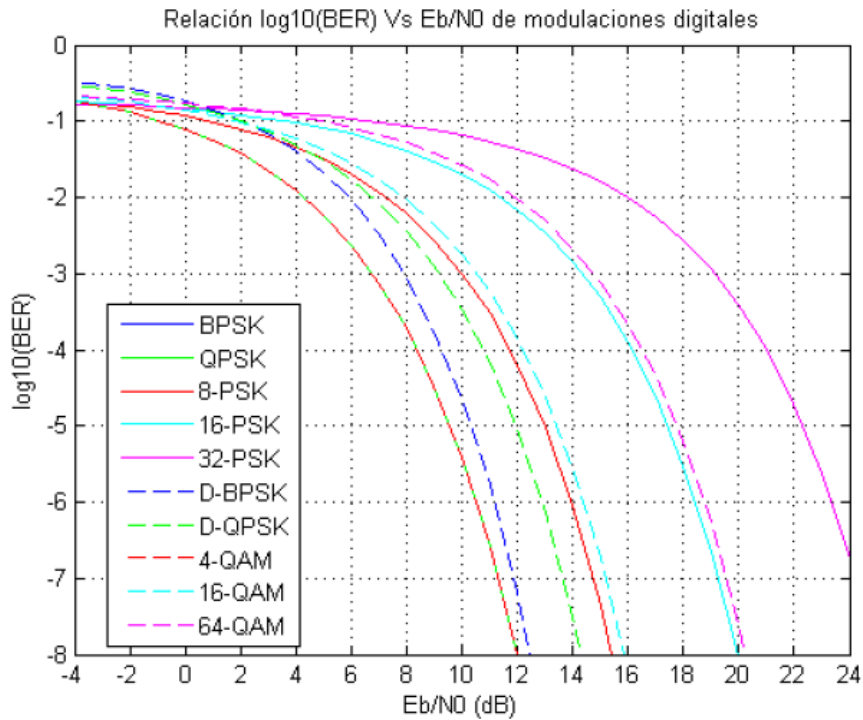


Figura 2.7 BER vs E_b/N_0 para distintas modulaciones digitales [12]

2.8 Diversidad

La diversidad consiste en la transmisión de la misma información por dos caminos radioeléctricos diferentes, que se vean afectados de forma independiente por el desvanecimiento. A caminos radioeléctricos nos referimos a cualquiera de los parámetros del vano (recorrido, frecuencia, ángulo, polarización). En los sistemas de diversidad se dispondrá en recepción de dos o más señales con poca correlación mutua, que deberán procesarse de alguna forma para generar una única señal [1].

Entre las ventajas de la diversidad pueden destacarse una gran reducción del porcentaje de tiempo para un desvanecimiento dado, aumento de la fiabilidad del radioenlace al existir cierta redundancia, también puede conseguirse mejor calidad de la relación S/N o en la tasa de error.

Las técnicas de diversidad pueden clasificarse de la siguiente manera [1]:

- 1) Según los parámetros del camino radioeléctrico:
 - Diversidad de espacio.
 - Diversidad de frecuencia.
 - Diversidad de ángulo.
 - Diversidad de polarización.
 - Diversidad de trayecto.
- 2) Según el tipo de procesamiento de la señal:
 - Diversidad de conmutación.
 - Diversidad de combinación.

2.8.1 Diversidad de espacio

En la diversidad por espacio se habilitan dos trayectorias, con dos antenas de recepción separadas verticalmente, de manera que la señal transmitida por un único transmisor se reciba por dos caminos diferentes, en dos antenas receptoras separadas con una salida combinada, con la ventaja que se utiliza una sola frecuencia. En caso de avería en el transmisor, el enlace se interrumpe. La diversidad de espacio es una de las medidas más eficaces contra el desvanecimiento multitrayecto.

Una separación vertical conveniente entre antenas viene dada por [1]:

$$\Delta h = \frac{\lambda d}{4h} \geq 150\lambda \quad (2.11)$$

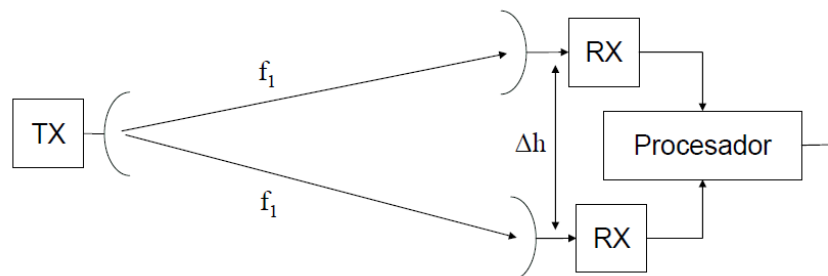


Figura 2.8. Esquema diversidad de espacio [13]

2.8.2 Diversidad de frecuencia

La diversidad de frecuencia es más compleja y costosa que la diversidad de espacio, por lo que se debe en la medida de lo posible evitar utilizarse para ahorrar espectro. Consiste en una doble transmisión y en una doble recepción utilizando frecuencias distintas, de forma que cuando una señal sufre desvanecimiento (oposición de fase), la otra se recibe en fase, para conseguir una buena descorrelación, la separación relativa de las frecuencias deberá ser del 3-5 %, aunque debido a la escasa disponibilidad de frecuencias, es habitual emplear separaciones del 2% o incluso del 1%. Esta técnica aumenta considerablemente la fiabilidad del enlace [1].

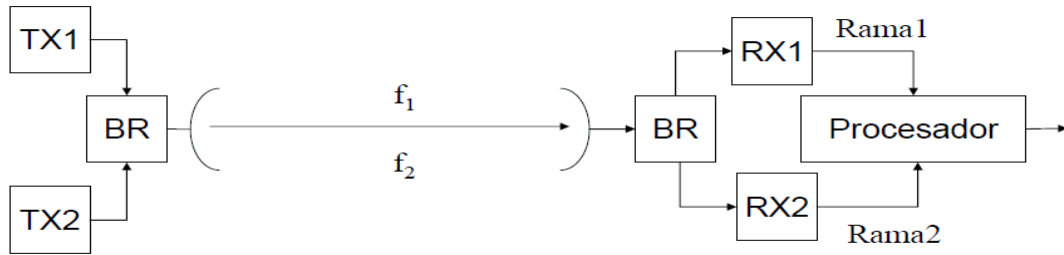


Figura 2.9. Esquema diversidad de frecuencia [13]

2.8.3 Diversidad de trayecto

En el caso de desvanecimiento originado por precipitaciones, las técnicas anteriormente descritas no ofrecen ningún tipo de protección. Por lo tanto existe la posibilidad de realizar el enlace en paralelo recorriendo dos caminos diferentes. Este método es muy caro, ya que exige más repetidores y emplazamientos para los mismos, por lo tanto su uso sólo estará justificado en circunstancias excepcionales, como puedan ser radioenlace de emergencia, o en zonas con una climatología muy desfavorable [1].

2.8.4 Diversidad de ángulo

La diversidad de ángulo implica el uso de antenas con dos o más haces separados por pequeños ángulos en el plano vertical, o bien en antenas separadas apuntando con ángulos diferentes [1].

2.8.5 Diversidad de polarización

En este método dos señales procedentes del radiotransmisor se envían simultáneamente por dos antenas separadas, una con polarización vertical y la otra horizontal. La diversidad de polarización resulta útil para la transmisión por onda indirecta en la parte baja del espectro de frecuencias.

En cambio, este método no da resultados en la transmisión de microondas por onda espacial debido a que generalmente ambas señales polarizadas se desvanecen al mismo tiempo.

2.8.6 Tratamiento de la señal en los sistemas de diversidad

El tratamiento de la señal consiste en las operaciones que se realizan con las señales entregadas por los receptores del sistema de diversidad para obtener una única salida del conjunto receptor. Se suele denominar a este proceso selección y puede ser de dos tipos [1].

2.8.6.1. Selección por conmutación

En la selección por conmutación, se elige la mejor señal entre las presentes, sobre la base de un análisis de intensidad de las mismas, efectuándose una conmutación para conectar el receptor correspondiente a esa señal más intensa [1].

2.8.6.2. Selección por combinación

En este método se combinan las señales procedentes de las ramas de diversidad para obtener la salida única.

Hay dos tipos básicos de combinación [1]:

- 1) *Combinación lineal*: Las señales en banda base se ponen en fase y se suman, siempre que las relaciones señal a ruido (S/N) no difieran excesivamente entre sí.
- 2) *Combinación de relación máxima*: Es un método de adición lineal de señales puestas en fase y ponderadas con unos factores de ganancia.

2.8.7 Mejora por diversidad

Con la diversidad se logra una mejora en la S/N en los radioenlaces analógicos o la Peb en los digitales a través de técnicas de combinación, así como una reducción en los porcentajes de tiempo en que se rebasa una determinada profundidad de desvanecimiento.

El factor de mejora por diversidad I, es la relación entre las probabilidades de que se supere una determinada profundidad de desvanecimiento en los trayectos protegidos o no protegidos [1]:

$$I = P(F)/P_d(F) \quad (2.12)$$

Para los radioenlaces digitales, se define el factor de mejora como el cociente entre los tiempos en que se rebasa una determinada BER con y sin protección.

2.8.7.1 Factor de mejora para diversidad de espacio

La Recomendación UIT-R P.530-16 [7], proporciona una expresión para el factor de mejora de diversidad de espacio, en sistemas de banda estrecha sobre trayectos terrenales:

$$I = [1 - \exp(-0.04 s^{0.87} f^{-0.12} d^{0.48} P_o^{-1.04})] 10^{(F-V)/10} \quad (2.13)$$

Donde

$$P_o = P(F) \cdot 10^{F/10}$$

F: profundidad de desvanecimiento para el trayecto no protegido (dB)

V: $|G_1 - G_2|$, siendo G1 y G2 las ganancias de las antenas terminales en dB

d: longitud del enlace en km ($43 < d < 240$)

f: frecuencia en GHz. ($2 < f < 11$)

s: separación vertical entre los centros de las antenas en metros. ($3 < s < 23$)

2.8.7.2 Factor de mejora para diversidad de frecuencia

Según la Recomendación UIT-R P.530-16 [7], el factor de mejora para sistemas 1 + 1 con diversidad en frecuencia en trayectos donde no se produzcan reflexiones superficiales intensas es:

$$I = \frac{0.8}{f \cdot d} \left(\frac{\Delta f}{f} \right) 10^{F/10} \quad (2.14)$$

Donde:

f: frecuencia central de la banda (GHz) ($2 < f < 11$)

d: longitud del trayecto (km) ($30 < d < 70$)

$\Delta f/f$: Separación relativa de frecuencias (%) ($\Delta f/f < 5\%$)

NOTA: si $\Delta f > 0.56$ GHz se toma 0.5.

NOTA: La ecuación (2.14) se considera válida para valores de $I > 5$.

Capítulo 3. RadioSim

3.1 Introducción a RadioSim.

RadioSim es una herramienta de simulación de radioenlaces diseñada mediante el programa de cálculo Matlab y su interfaz gráfica de usuario llamada GUIDE. El programa calcula todos los parámetros necesarios para estudiar la viabilidad del enlace, tales como pérdidas por lluvia, por propagación, por absorción atmosférica, porcentajes de indisponibilidad, etc. Una vez calculados todos los parámetros que afectan a la calidad del radioenlace, el programa genera un informe recogiendo los resultados obtenidos.

3.2 Funcionamiento de RadioSim

En primer lugar se debe ejecutar desde Matlab el fichero .fig o su versión standalone .exe desde cualquier sistema que no disponga de Matlab.

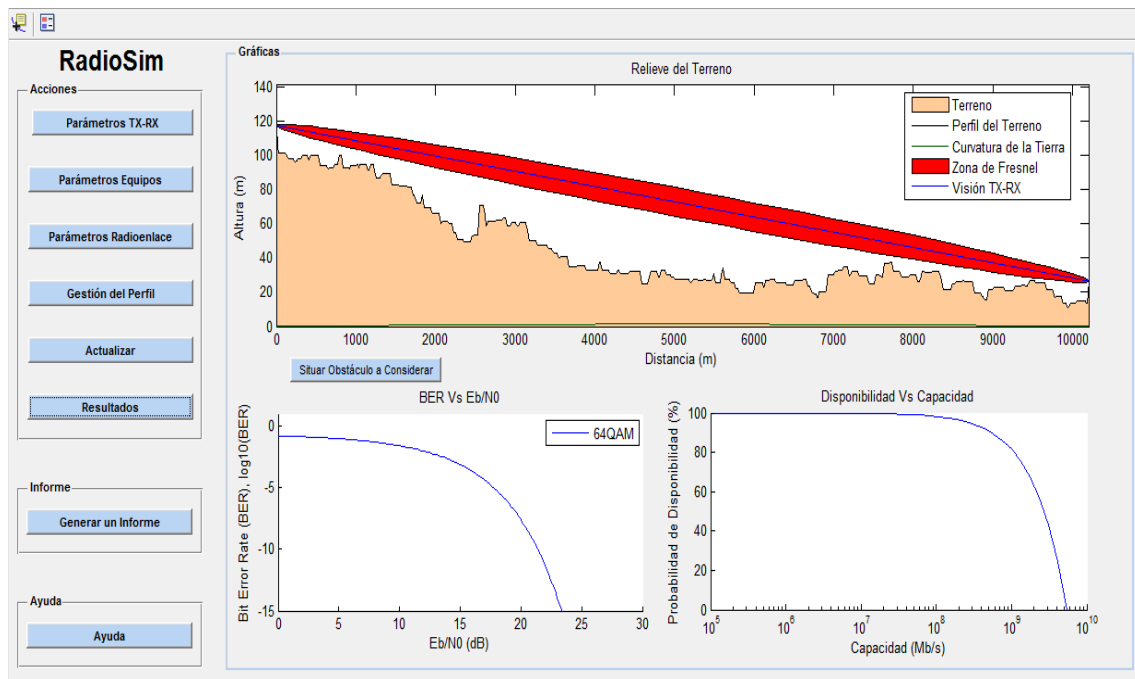


Figura 3.1 Pantalla inicio RadioSim

Al ejecutar el programa nos aparece la pantalla de inicio (Fig. 3.1), en primer lugar debemos introducir los parámetros del transmisor y receptor (Fig.3.2), tales como potencia, ganancia, altura de las antenas, así como la distancia del radioenlace y la frecuencia de funcionamiento entre otros. En segundo lugar debemos introducir los parámetros relacionados con los equipos que se van a utilizar (Fig 3.3) y en último lugar tenemos que elegir los parámetros del radioenlace (Fig 3.4), tales como las constantes k y α de lluvia (Tabla 2.1), el parámetro k terrestre o la tasa pluviométrica de la zona del radioenlace.

ParametrosTXRX

Parámetros TX-RX

Transmisor

Potencia (dBm)

Ganancia Antena (dB)

Pérdidas Internas (dB)

Altura de Antena (m)

Receptor

Ganancia Antena (dB)

Pérdidas Internas (dB)

Altura de Antena (m)

Distancia TX-RX (m)

Frecuencia (GHz)

Ángulo Polarización (grados)

Aplicar

Figura 3.2 Parámetros de transmisión y recepción

ParametrosEquipos

Parámetros Equipos

Factor Ruido Recepción (dB)

Umbral de Recepción (dBm)

BER de Equipo

Ancho de Banda (MHz)

Modulación

Velocidad Binaria (b/s)

Tasa de Codificación

MTBF (horas)

MTTR (horas)

Aplicar

Figura 3.3 Parámetros relacionados con los equipos

ParametrosRadioenlace

Parámetros Radioenlace

Parámetro k Terrestre

Lluvia

Constante k Horizontal

Constante k Vertical

Alfa Horizontal

Alfa Vertical

Rp (mm/h)

Factor Ocurrencia de Desvanecimiento

Aplicar

Figura 3.4 Parámetros del Radioenlace

Una vez introducidos todos los parámetros de nuestro enlace, el siguiente paso es gestionar el perfil.

3.2.1 Gestión del perfil del radioenlace

Los relieves que se utilizarán para la simulación en Radiosim se obtendrán a partir de una página web (<http://www.heywhatsthat.com/profiler.html>) [14], la cual utiliza para obtener el relieve la base de datos realizada a partir de la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [15], realizada por la Agencia Geológica de los Estados Unidos [16], la NASA y el Observatorio Naval de los Estados Unidos, dicha base de datos es la misma que utiliza Google Earth o softwares de simulación de radioenlaces como LINKPlanner, aunque en este, se utilizan mejoras del proyecto ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), también impulsado por la NASA y el gobierno de los Estados Unidos, que proporcionan una mejor precisión de los relieves y puede diferir del relieve de otras fuentes ya que se tiene en cuenta el relieve provocado por la vegetación.

En primer lugar habrá que generar el relieve, para ello se seguirán los siguientes pasos:

- 1) El usuario tendrá que entrar en la página web que se especifica en la Ayuda del programa: <http://www.heywhatsthat.com/profiler.html> [14], la cual permite obtener el perfil entre dos puntos situados por el usuario en un mapa que usa Google Maps.

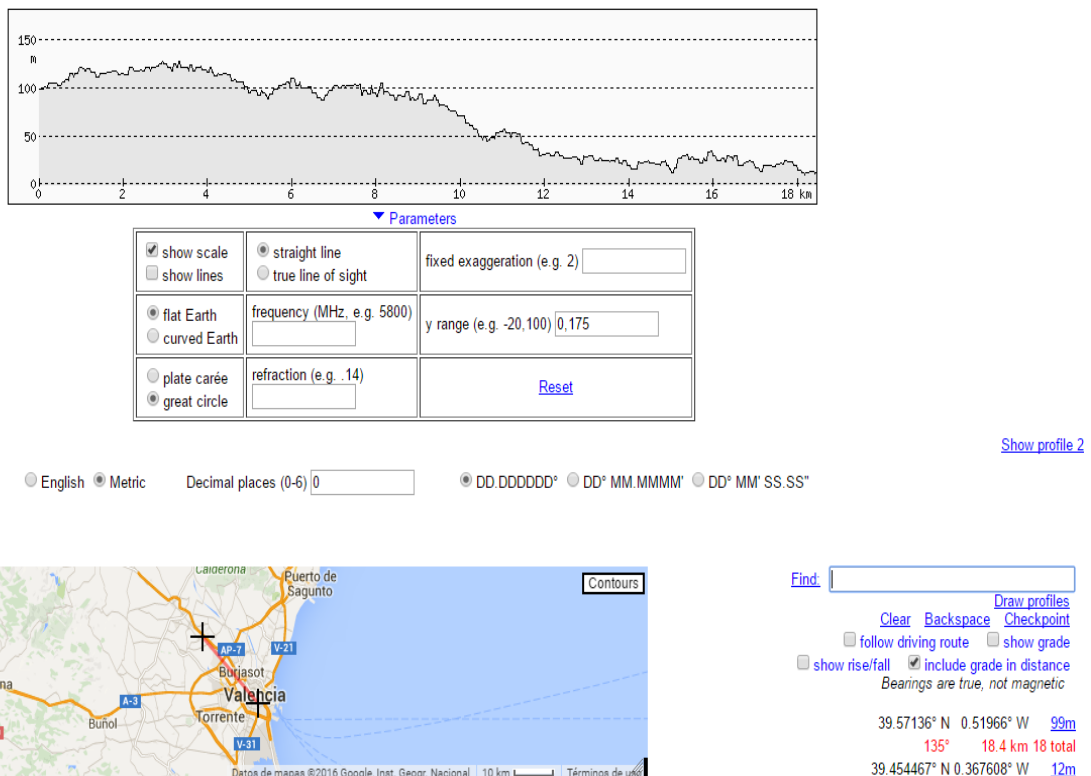


Figura 3.5 Selección de las coordenadas para la generación del relieve

El usuario deberá guardar la imagen generada por la página usando la siguiente configuración:

▼ Parameters

<input type="checkbox"/> show scale	<input checked="" type="radio"/> straight line	fixed exaggeration (e.g. 2) <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> show lines	<input type="radio"/> true line of sight	
<input checked="" type="radio"/> flat Earth	frequency (MHz, e.g. 5800) <input type="text"/>	y range (e.g. -20,100) <input type="text" value="0,175"/>
<input type="radio"/> curved Earth		
<input type="radio"/> plate carée	refraction (e.g. .14) <input type="text"/>	Reset
<input checked="" type="radio"/> great circle		

English Metric Decimal places (0-6)
 DD.DDDDDD° DD° MM.MMMM' DD° MM' SS.SS"

Figura 3.6 Configuración para guardar la imagen generada

En el cuadro de *y range* el usuario deberá elegir un rango de altura que sea $[0,x]$ siendo x la altura máxima que quiere que se represente. Si por ejemplo en transmisión se tiene una cota de 150 metros como en este caso, poner $[0,175]$ será suficiente. El usuario tendrá entonces que guardar la imagen haciendo click derecho y *Guardar Imagen Cómo*.

- 2) El siguiente paso es convertir la imagen guardada *.png* en un fichero de texto *.txt*, para ello el usuario deberá entrar en *Gestión de Perfil* y posteriormente en *Generar Fichero de Terreno (.txt) a Partir de una Imagen*.

Generación del Terreno

Nombre del Fichero

Altura Máxima (m) Distancia (m)

Preview del Terreno

Relieve del Terreno

Altura (m)

Distancia (m)

Figura 3.7 Generación del fichero .txt

Se deberá introducir la ruta de donde se encuentra el fichero *.png* y la ruta donde se quiere guardar el fichero *.txt*, así como se deberá introducir la altura máxima del enlace y su distancia.

- 3) Una vez guardado el fichero *.txt* bastara con introducir la ruta del fichero de texto que se ha generado en *Cargar Archivo de Terreno (.txt)*.

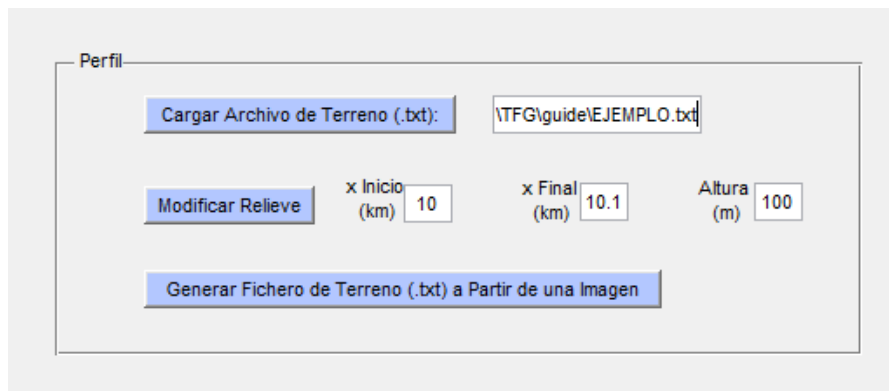


Figura 3.8 Cargar relieve

Tras ello, con el botón actualizar se cargará y representara el relieve en el programa (Fig. 3.9), es importante antes de actualizar, introducir el obstáculo que quiere considerarse presionando el botón *Situar Obstáculo a Considera*, al haber varios posibles obstáculos que influyan en el rendimiento del enlace, el usuario escogerá aquél que crea conveniente. De esta forma, a pesar de que el relieve está ya generado y representado, el usuario puede probar situaciones diferentes a las que presenta el terreno sin tener que cargar uno nuevo.

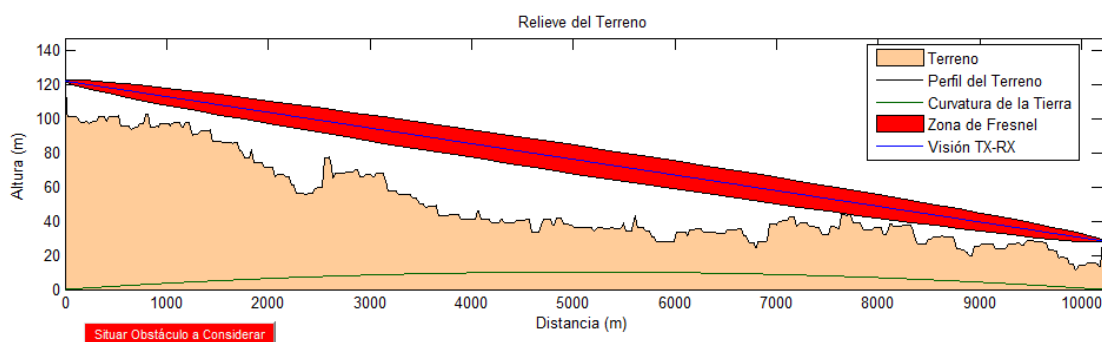


Figura 3.9 Ejemplo del relieve cargado

3.2.2 Resultados

Para finalizar, una vez introducidos los parámetros del enlace y cargada la imagen del relieve, solo quedará obtener los resultados de nuestro radioenlace para poder analizar y comprobar su viabilidad, para ello bastara con presionar el botón de resultados y automáticamente se dibujaran las gráficas de BER vs Eb/No y disponibilidad vs capacidad, así como se mostraran los resultados de potencia, pérdidas, indisponibilidad y ruido.

Finalmente el programa nos da la opción de generar un archivo *.pdf* con todos los resultados obtenidos.

Capítulo 4. Diseño del Radioenlace

4.1 Planteamiento del problema

En este trabajo se va a realizar el diseño de un radioenlace de emergencia entre el Centro de Coordinación de Emergencias situado en la Eliana, Valencia y la Estación Central de Bomberos de Valencia. Al tratarse de un sistema de emergencia se deberá diseñar el radioenlace de modo que disponga de una alta disponibilidad, seguridad, fiabilidad y capacidad.

4.2 Estudio de los vanos del Radioenlace

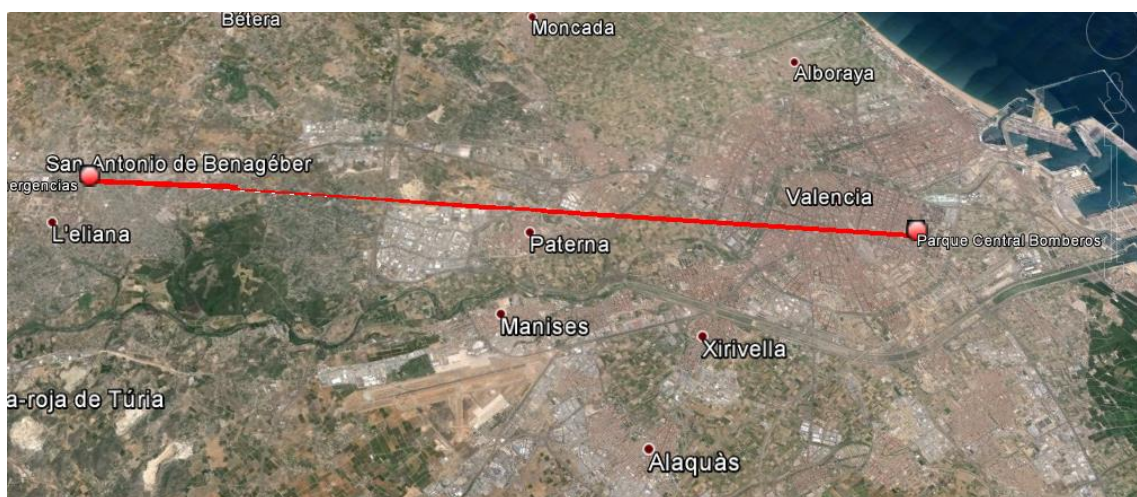


Figura 4.1 Mapa de las estaciones transmisora y receptora

El primer paso será estudiar el perfil del radioenlace, para ver si hay visibilidad directa o en cambio será necesario el uso de diferentes vanos.

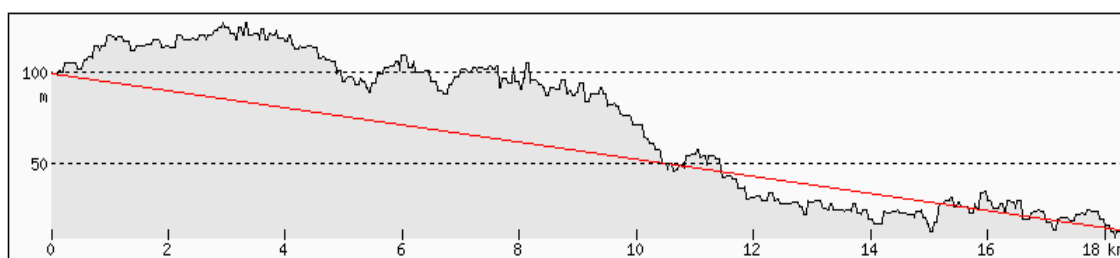


Figura 4.2 Perfil Centro de Emergencias – Estación Central de Bomberos

Como se puede observar en la Figura 4.2, no existe visibilidad directa entre nuestras dos estaciones, por lo tanto se deberá diseñar un radioenlace con vanos. El siguiente paso será estudiar el número de vanos y su situación geográfica.

En primer lugar se estudió la opción de realizar el radioenlace con 2 vanos, la situación sería tal y como se muestra en la siguiente imagen:

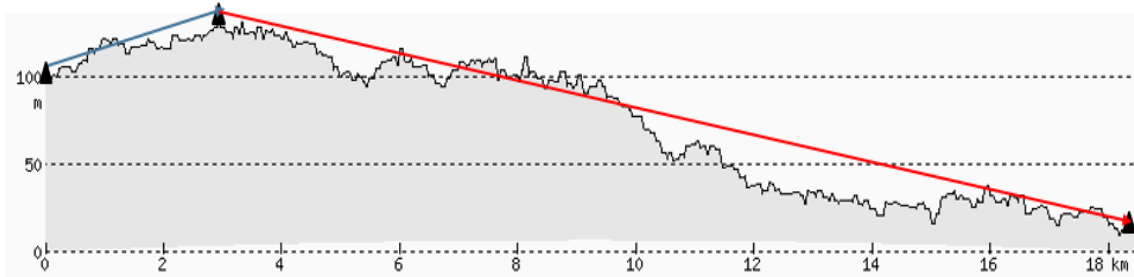


Figura 4.3 Perfil Centro de Emergencias – Estación Central de Bomberos con 2 vanos

Vemos que no tenemos visión directa en ningún vano, aunque en el primer vano se podría solucionar este problema usando antenas de unos 20 m de altura, en el segundo vano el fenómeno de la difracción será más importante ya que dicho fenómeno es importante si el obstáculo se encuentra dentro de lo que se denomina elipsoide de Fresnel, más precisamente, se considera que no hay obstáculo cuando éste se encuentra fuera de la zona delimitada por el 60% de la primera zona de Fresnel y en este incluso instalando las antenas altas afectaría de manera considerable.

En la siguiente imagen sacada de RadioSim, se ha hecho la simulación del perfil para el segundo vano, utilizando antenas de 20 m, se puede observar que un obstáculo montañoso interfiere en la línea de visión directa entre el transmisor y el receptor.

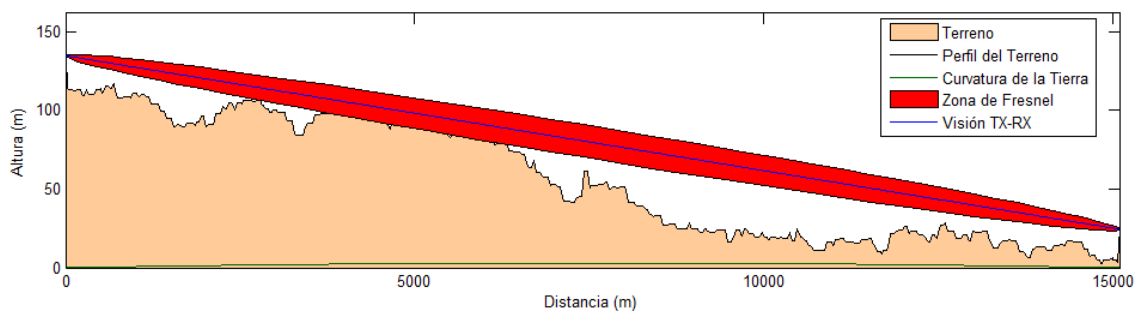


Figura 4.4 Perfil del segundo vano con RadioSim

Tras realizar la simulación para distintos equipos y distintas modulaciones, con una antena relativamente grande, de mucha ganancia, se obtuvieron unos resultados francamente negativos en cuanto a disponibilidad del radioenlace, como se puede ver en la tabla 4.1, que para nada cumplían con los objetivos esperados, por lo tanto se descartó la opción de realizar el radioenlace con únicamente 2 vanos, ya que como habíamos previsto, el fenómeno de difracción hace inviable esta opción.

ANTENA	ALCATEL		PTP800		ECLIPLSE		TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON			
	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Pérdidas difracción(dB)	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37
Indisponibilidad total(%) 0,01%	51,195	0,119	0,597	9,323	14,434	0,654	3,239	102,190	0,214	0,733	1,295	20,384	22,870
Indisponibilidad temporal anual(horas)	4487,66	10,46	52,36	817,20	1265,22	57,33	283,94	8957,80	18,73	64,22	113,51	1786,83	2004,77

Tabla 4.1 Resultados de disponibilidad para el vano 2 para una antena de 3m/10ft (48,3 dB)

Para solucionarlo, se obtó por realizar el radioenlace con 3 vanos, situando una estación repetidora en el obstáculo que nos daba problemas en la solución anterior y así conseguir reducir considerablemente las pérdidas por difracción.

En la figura 4.5 se puede observar la colocación de los vanos en el perfil.

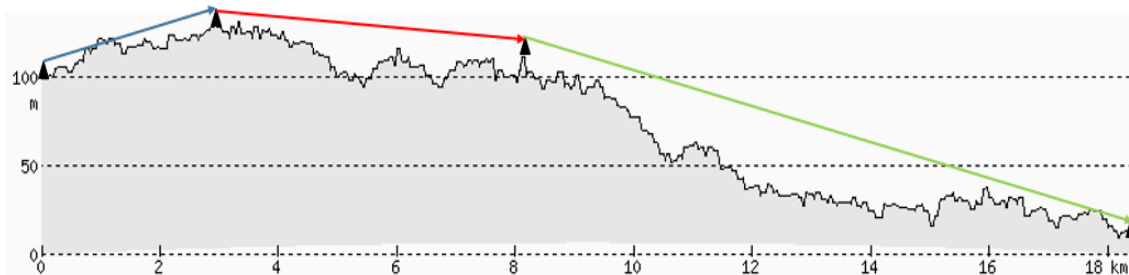


Figura 4.5 Perfil Centro de Emergencias – Estación Central de Bomberos con 3 vanos

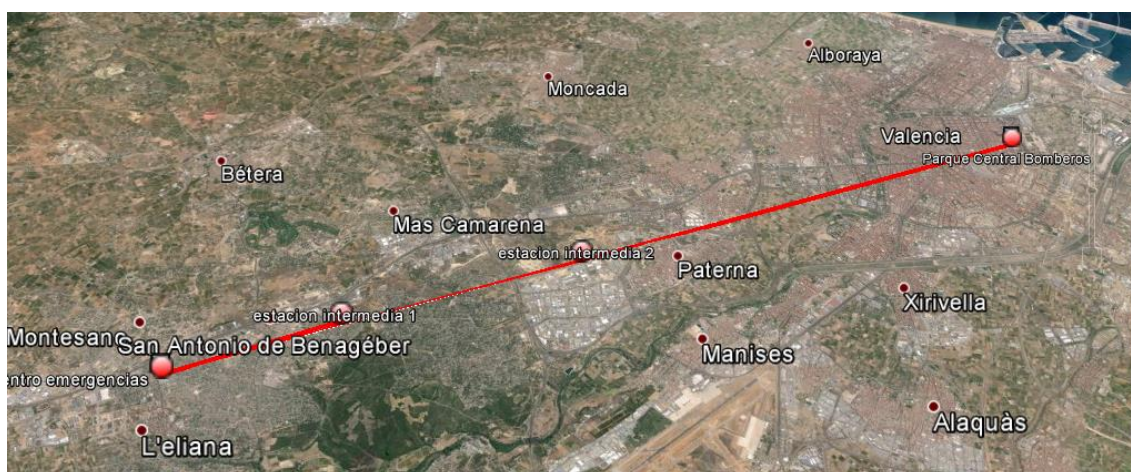


Figura 4.6 Mapa de situación geográfica de las estaciones del sistema con 3 vanos

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
Centro Emergencias	39°27'15.15" N	0°22'03.34" O	99 m
Estación intermedia 1	39°33'02.19" N	0°29'28.66" O	119 m
Estación intermedia 2	39°31'10.53" N	0°27'05.05" O	101 m
Centro de Bomberos	39°27'16.10" N	0°22'03.40" O	20 m

Tabla 4.2 Coordenadas y cotas de los emplazamientos

4.3 Frecuencias de operación

En primer lugar se deberá elegir la banda de frecuencias en la que vamos a realizar el radioenlace. En el Reglamento de Radiocomunicaciones figuran atribuciones de varias bandas de frecuencias a los radioenlaces del Servicio Fijo, en 2, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 23, 27, 31, 38 y 55 GHz. De forma periódica, el UIT-R ha ido desarrollando recomendaciones relativas a la canalización de estas bandas para radioenlaces analógicos y digitales que figuran en la serie F de Recomendaciones. La mayoría de las administraciones de Telecomunicaciones se basan en ellas para elaborar sus propios planes de frecuencias para el servicio fijo y proporcionan detalles adicionales sobre la utilización de las frecuencias.

Al tratarse de un radioenlace de emergencia, se deberá elegir una banda de frecuencias que permita transmitir con una alta capacidad, con un gran ancho de banda y que no se vea afectado de una manera muy fuerte por las diferentes atenuaciones que se dan en un radioenlace, como las pérdidas por lluvia, por vegetación, por atenuación atmosférica, las cuales aumentan con la frecuencia. Las bandas más bajas están saturadas en todo el mundo, por lo que se decidió utilizar una de las bandas por encima de los 10 GHz

Teniendo en cuenta lo anterior y con ayuda del *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias* (CNAF)[17] que es el instrumento legal, dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España, utilizado para asignar a los distintos servicios de radiocomunicaciones las diferentes bandas de frecuencias, se decidió utilizar la banda de 11 GHz, ya que problemas de alcance no tendremos porque se trata de un radioenlace de menos de 20 km de longitud y es la que mejor se adapta a las necesidades y objetivos del radioenlace a diseñar.

Según las notas UN CNAF[18], la banda 10,7 a 11,7 GHz, se aplica a radioenlaces digitales fijos de la red troncal de transporte con capacidades iguales o superiores a unos 140 Mbit/seg, lo cual no significa ningún problema ya que tenemos que diseñar un radioenlace con un alta capacidad.

La disposición de radiocanales para sistemas inalámbricos fijos que funcionan en la banda de 10,7 – 11,7 GHz viene explicada en la Recomendación ITU-R F.387 [19].

La separación de canales recomendada en dicha Recomendación es de 40 MHz con bandas de guarda de 15 y 55 MHz, así como una segunda disposición en la que se utiliza también una separación de canales de 40 MHz, aunque con una banda de guarda de 35 MHz.

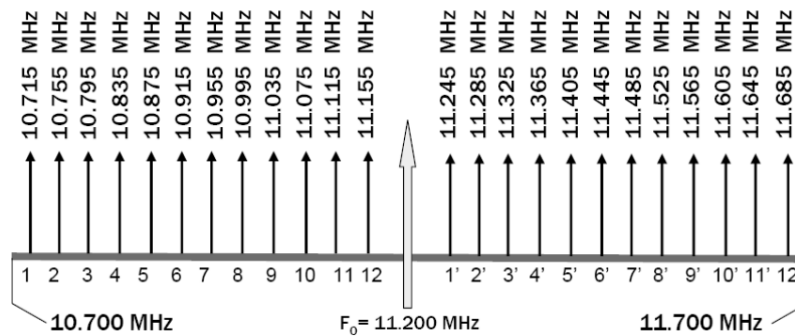


Figura 4.7 Disposición de los radiocanales en la banda de 11 GHz

Donde

$$\text{Para la mitad inferior de la banda: } f_n = f_0 - 525 + 40n \quad \text{MHz}$$

$$\text{Para la mitad superior de la banda: } f_{n'} = f_0 + 5 + 40n \quad \text{MHz}$$

Siendo:

$n = 1, 2, 3, \dots, 12$ en las bandas tanto inferiores como superiores (para una disposición de 12 canales con bandas de guarda ZS_1 de 15 MHz);

o $n = 2, 3, 4, \dots, 12$ en la mitad inferior de la banda; y

$n = 1, 2, 3, \dots, 11$ en la mitad superior de la banda (para una disposición de 11 canales con bandas de guarda ZS_1 de 55 MHz).

4.4 Equipos de Transmisión

Con respecto a los equipos de transmisión, en el mercado hay varios fabricantes que proporcionan sus hojas de especificaciones en su web de donde se pueden sacar los parámetros necesarios para la simulación del radioenlace. Entre ellos se ha valorado la posibilidad de realizar el radioenlace con equipos de la marca Ceragon como la familia *FibeAir IP-20C*[20] o la familia *FiberAir IP-10C*, de la marca Alcatel como *Alcatel-Lucent 9500 Microwave Cross-Connect*[21], de Cambium Networks como la serie *PTP 800*[22], así como de otras marcas menos conocidas como Aviat Networks, BridgeWave communications o Trango Systems[23]. Todos estos equipos tienen disponibles sus hojas de especificaciones con los parámetros de simulación necesarios, en cambio había otras marcas como es el caso de Siemens o Motorola que no tienen disponibles sus hojas de especificaciones y solo las proporciona a empresas y demás organizaciones privadas, por lo que se descartó el uso de estos equipos.

En este trabajo se realizará el diseño del radioenlace para distintos equipos, para así poder elegir las soluciones que mejores resultados nos proporcionen en términos de capacidad, disponibilidad, económicos, etc...

4.5 Antenas

Con respecto a las antenas, la empresa Commscope anteriormente Andrew [24], tiene en su web oficial información sobre antenas de todas las frecuencias de las bandas licenciadas.

Se realizaron las simulaciones con varias antenas en la banda de 11 GHz, de diferente tamaño y por lo tanto diferente ganancia con el fin de elegir la opción más económica que cumple con los objetivos especificados.

	HPX10-107-D1A	VHLPX6-11-2GR/A	HPX4-107-D3A	SHPX3-11W-3GR	VHLPX-2-11W/A
	3m/10 ft	1,8m/6ft	1,2m/4ft	1m/3ft	0,6m/2ft
Polarización	dual	dual	dual	dual	dual
Ancho haz horizontal (grados)	0,7	1,1	1,6	2	3,3
Ancho haz vertical (grados)	0,7	1,1	1,6	2	3,3
Discriminación polarización cruzada XPD(dB)	30	30	30	30	34,5
Relación delante-atrás(dB)	70	70	62	69	61
Perdidas de retorno(dB)	30,7	17,7	26,4	17,7	17,7
Ganancia banda media(dBi)	48,3	43,8	40,3	38,4	34,5

Tabla 4.3 Características de las antenas elegidas

4.6 Cable

El cable para la implementación del enlace será un cable coaxial TCF500 [25].

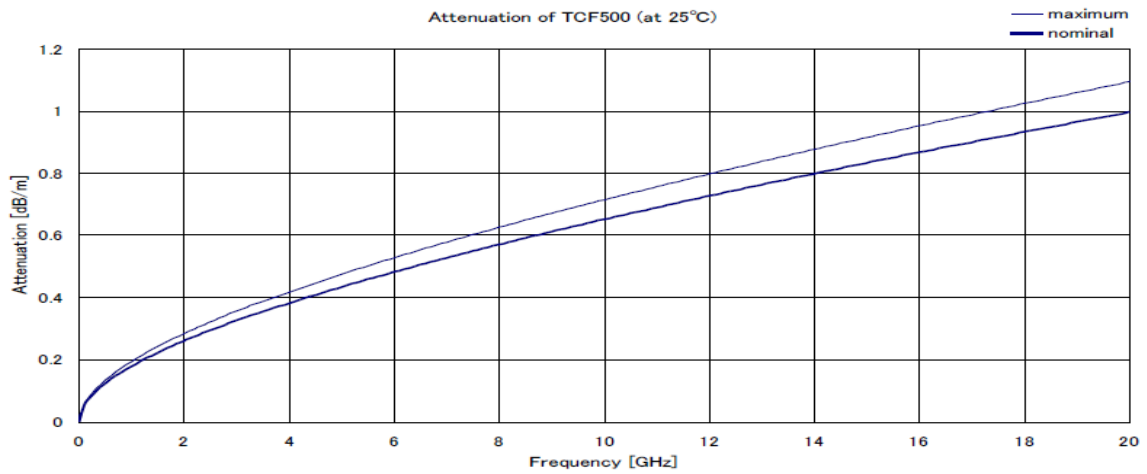


Figura 4.8 Atenuación cable coaxial TCF500 [25]

4.7 Simulación del radioenlace con RadioSim

4.7.1 Diseño del primer vano

Como se explicó en el apartado (3.2.1), obtenemos el perfil de nuestro enlace. Dicha imagen del perfil tiene una resolución de 4,25 m por píxel, lo cual es el resultado de dividir la distancia del vano entre el número de píxeles de ancho de la imagen, que en este caso son 800 píxeles.

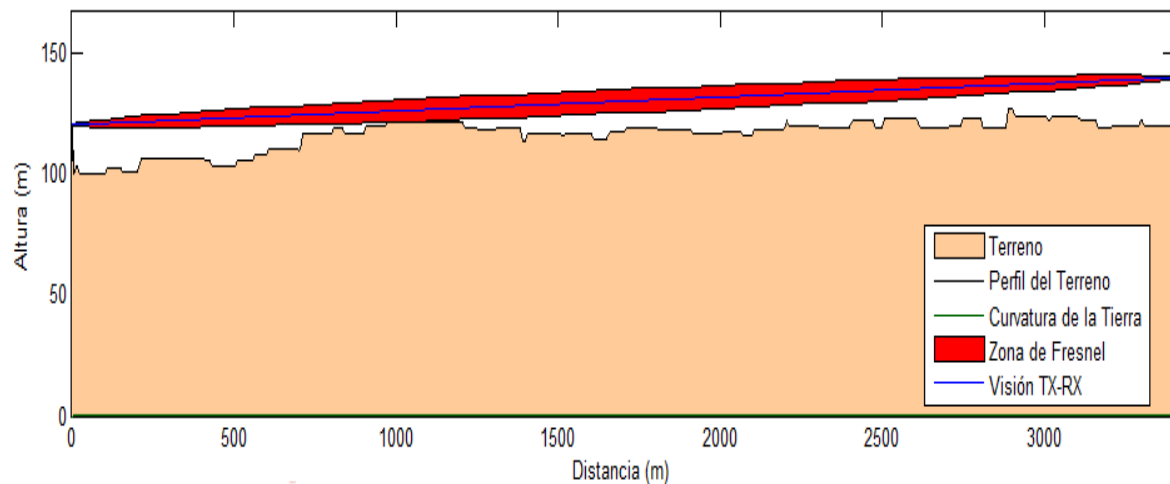


Figura 4.9 Relieve del primer vano

La distancia del primer vano es de 3.400 m, y la altura de donde situamos la estación transmisora es de 100 m, mientras que la receptora es de 119 m.

4.7.1.1 Parámetros de transmisión – recepción

Dentro de las banda de frecuencias se eligieron las frecuencias f_1 y f_2 del radioenlace, f_1 se utilizará como frecuencia de emisión en el primer y tercer vano y de recepción en el segundo vano, mientras que f_2 se utilizará como frecuencia de transmisión en el segundo vano y frecuencia de recepción en el primer y tercer vano, siendo así iguales entre sí las frecuencias de transmisión y recepción en cada estación. Es necesario que ambas frecuencias estén suficientemente separadas debido a la gran diferencia entre los niveles de señales transmitida y recibida que pueden ser de 60 a 90 dB, a la necesidad de evitar acoples entre ambos sentidos de transmisión y a la directividad insuficiente de las antenas. Por lo tanto se eligió $f_1 = 10,715$ MHz y $f_2 = 10,875$ MHz.

El ancho de banda utilizado en la transmisión de acuerdo con la banda de frecuencias utilizada, será de 40 MHz.

Debido a esta fuerte reutilización de las frecuencias pueden producirse interferencias cocanal, para reducir al mínimo los efectos de estas posibles interferencias, se cambia la polarización de la onda en cada vano. Por lo tanto utilizamos polarización horizontal en el primer y tercer vano y polarización vertical en el segundo vano. En el programa se deberá introducir un ángulo de polarización de 90 grados para polarización horizontal y de 0 grados para la polarización vertical, ya que el ángulo de polarización es el ángulo medido desde la vertical.

La altura de las antenas en este emplazamiento será de 20 m tanto en emisión como en recepción, es una altura relativamente grande, pero así conseguimos reducir considerablemente las pérdidas por difracción y conseguir una disponibilidad que este dentro de los objetivos ya que se consigue visibilidad directa.

En este emplazamiento se realizaron las simulaciones para antenas de ganancia 38,4 dB, 43,8 dB y 34,5 dB, ya que al tratarse de un enlace de poca longitud con las antenas de poca ganancia se podría conseguir unos resultados óptimos.

El cable utilizado introduce una atenuación a la frecuencia de 10,7 MHz de 0,6891 dB/m y los conectores elegidos una atenuación de 0,25 dB/conector, así se obtuvieron unas pérdidas internas tanto en transmisión como en recepción de 14,28 dB.

Pérdidas internas TX(dB)	14,282
Altura antena TX(m)	20
Ganancia(dB)	48,3
Pérdidas internas RX(dB)	14,28
Altura antena RX(m)	20
Distancia TX-RX (m)	3400
Ángulo polarización(grados)	90
Frecuencia(GHz)	10,715

Tabla 4.4 Parámetros de TX y RX del primer vano

4.7.1.2 Parámetros básicos del radioenlace

Uno de los parámetros necesarios para la simulación es el parámetro k *Terrestre* el cual marca la curvatura de la tierra. Para el cálculo de dicho parámetro, es necesario conocer el gradiente del coindice en la zona geográfica donde vamos a realizar el radioenlace, la Recomendación UIT-R 453 [26] proporciona mapas con estos valores para distintos periodos del año. Para el cálculo del factor k , se cogió el valor del gradiente del coindice más desfavorable para la zona de nuestro radioenlace, el cual era para el mes de agosto con un valor de $\Delta N = -50$, y con este parámetro y el radio de la tierra $R_0 = 6.370$ km a través de la siguiente ecuación calculamos el parámetro k terrestre:

$$k = \frac{1}{1 + R_0 \Delta N 10^{-6}} = 1,467 \quad (4.1)$$

Para el cálculo de la atenuación por lluvia, será necesario disponer de la tasa pluviométrica de la zona donde se va a realizar el radioenlace, para la zona de Valencia tenemos una tasa de 32 mm/h, así como será necesario conocer las constantes k y α horizontales y verticales los cuales dependen de la frecuencia, estos valores se pueden obtener de la Recomendación UIT-R 838 [9].

K_h	0,01598
K_v	0,01536
α_h	1,22553
α_v	1,17615

Tabla 4.5 Coeficientes k y α para 10.7 GHz

También debemos calcular el factor de ocurrencia de desvanecimiento, necesario para calcular la indisponibilidad por fading como se explicó en el apartado (2.6.2), en la Recomendación UIT-R 530-16[7] se explica el método para su cálculo, será necesario para ello conocer el valor del gradiente de refractividad en los 65 m inferiores de la atmósfera no rebasado durante el 1% del año medio, este valor varía dependiendo de la zona geográfica en la que se construya el radioenlace, según la Recomendación UIT-R 453[26], para la zona donde se va a diseñar nuestro radioenlace es de $dN1 = -400$.

La fórmula para el cálculo del factor de ocurrencia es la siguiente:

$$P_o = kd^{3.4}(1 + |\varepsilon_p|)^{-1.03} f^{0.8} 10^{-0.0007h_L} \quad (4.2)$$

Donde:

$$K = 10^{-4.6 - 0.0027dN1} \quad (4.3)$$

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e|/d \quad (4.4)$$

Para la zona de diseño de nuestro radioenlace y las características del mismo, para el primer vano se obtuvo un factor de ocurrencia $P_o = 0,0144$.

4.7.1.3 Resultados de la simulación del vano 1

Se realizó el diseño para distintos equipos elegidos, los cuales tenían disponibles sus catálogos de especificaciones de donde se han sacado los parámetros de cada equipo necesarios para realizar la simulación.

En las tablas que se pueden ver a continuación vienen recogidos los datos obtenidos tras simular el enlace con el programa RadioSim.

- Antena VHLPX2-11W/A de diámetro 0,6m/2ft (G=34,5 dBi)

Equipos	ALCATEL	PTP800			ECLIPLSE
	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM
Velocidad binaria (Mbps)	155	52,6	103,9	181,9	150
Potencia transmitida(dBm)	21	28	26	21	18
Potencia recibida(dBm)	-63,56	-56,56	-58,56	-63,56	-66,56
Umbral de recepción (dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4	-73,5
Margen(dB)	13,1	30,8	23,5	11,5	9,6
Pérdidas propagación(dB)	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66
Pérdidas difracción(dB)	-1,36	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	7,05E-02	1,19E-03	6,43E-03	1,02E-01	1,58E-01
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	5,12E-06	4,78E-06	4,51E-06	1,71E-06	7,24E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	7,05E-02	1,19E-03	6,43E-03	1,02E-01	1,58E-01
Indisponibilidad temporal anual (horas)	6,180	0,105	0,564	8,933	13,833

Tabla 4.6 Resultados de la simulación del vano 1 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 34,5 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Velocidad binaria (Mbps)	65	137	240	220	328	446	722	939
Potencia transmitida(dBm)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia recibida(dBm)	-62,56	-62,56	-65,56	-60,56	-60,56	-61,56	-62,56	-62,56
Umbral de recepción (dBm)	-83	-76	64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Margen(dB)	23,1	16,1	1,1	28,1	22,6	20,1	12,6	7,6
Pérdidas propagación(dB)	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66
Pérdidas difracción(dB)	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	7,05E-03	3,53E-02	1,12E+00	2,23E-03	7,91E-03	1,41E-02	7,91E-02	2,50E-01
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	4,35E-06	2,55E-06	8,34E-02	5,14E-06	4,11E-06	2,33E-06	4,73E-06	1,30E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	7,05E-03	3,54E-02	1,20E+00	2,24E-03	7,92E-03	1,41E-02	7,91E-02	2,50E-01
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,618	3,099	105,297	0,196	0,694	1,234	6,937	21,915

Tabla 4.7 Resultados de la simulación del vano 1 para los equipos Trangolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 34,5 dBi

- Antena SHPX3-11W-3GR de diámetro 1m/3ft (G=38,4 dBi)

Equipos	ALCATEL	PTP800			ECLIPLSE
	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM
Velocidad binaria (Mbps)	155	52,6	103,9	181,9	150
Potencia transmitida(dBm)	21	28	26	21	18
Potencia recibida(dBm)	-55,77	-48,76	-50,76	-55,76	-58,76
Umbral de recepción (dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4	-73,5
Margen(dB)	20,9	38,6	31,3	19,3	17,4
Pérdidas propagación(dB)	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66
Pérdidas difracción(dB)	-1,36	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	1,17E-02	1,99E-04	1,07E-03	1,69E-02	2,62E-02
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	3,00E-06	2,52E-06	4,67E-06	1,54E-06	7,58E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	1,17E-02	2,01E-04	1,07E-03	1,69E-02	2,62E-02
Indisponibilidad temporal anual (horas)	1,029	0,018	0,094	1,483	2,298

Tabla 4.9 Resultados de la simulación del vano 1 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 38,4 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Modulaciones	65	137	240	220	328	446	722	939
Velocidad binaria (Mbps)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia transmitida(dBm)	-57,46	-54,76	-57,76	-52,76	-52,76	-53,76	-54,76	-57,76
Potencia recibida(dBm)	-83	-76	-64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Umbral de recepción (dBm)	28,2	23,9	8,9	35,9	30,4	27,9	20,4	12,4
Margen(dB)	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66
Pérdidas propagación(dB)	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37
Pérdidas difracción(dB)	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Pérdidas atmosféricas(dB)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debido a equipos(%)	1,17E-03	5,87E-03	1,86E-01	3,70E-04	1,31E-03	2,34E-03	1,31E-02	4,15E-02
Indisponibilidad debida a fading(%)	4,76E-06	4,66E-06	3,66E-06	3,40E-06	4,85E-06	5,15E-06	2,60E-06	3,49E-06
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	1,18E-03	5,87E-03	1,86E-01	3,73E-04	1,32E-03	2,34E-03	1,31E-02	4,15E-02
Indisponibilidad total(%) 0,01%	0,103	0,515	16,262	0,033	0,116	0,205	1,151	3,641

Tabla 4.10 Resultados de la simulación del vano 1 para los equipos Trangolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 34,5 dBi

- Antena VHLPX6-11-2GR/A de diámetro 1,8m/6ft (G=43,8 dBi)

Equipos	ALCATEL	PTP800		ECLIPLSE
	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM
Modulaciones	155	52,6	103,9	181,9
Velocidad binaria (Mbps)	21	28	26	21
Potencia transmitida(dBm)	-44,87	-37,96	-39,96	-44,96
Potencia recibida(dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4
Umbral de recepción (dBm)	31,69	49,4	42,1	30,1
Margen(dB)	123,66	123,66	123,66	123,66
Pérdidas propagación(dB)	-1,36	-1,37	-1,37	-1,37
Pérdidas difracción(dB)	2,66	2,66	2,66	2,66
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	0,05	0,05	0,05	0,05
Pérdidas atmosféricas(dB)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debido a equipos(%)	1,23E-04	1,65E-05	8,88E-05	1,41E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	4,58E-06	8,14E-06	1,37E-06	4,91E-06
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	1,27E-04	2,47E-05	9,02E-05	1,41E-03
Indisponibilidad total(%) 0,01%	0,011	0,002	0,008	0,124
Indisponibilidad temporal anual (horas)				0,192

Tabla 4.11 Resultados de la simulación del vano 1 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 43,8 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Modulaciones	65	137	240	220	328	446	722	939
Velocidad binaria (Mbps)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia transmitida(dBm)	-43,96	-43,96	-46,96	-41,96	-41,96	-42,96	-43,96	-49,96
Potencia recibida(dBm)	-83	-76	64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Umbral de recepción (dBm)	41,7	34,7	19,7	46,7	41,2	38,7	31,2	20,2
Margen(dB)	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66	123,66
Pérdidas propagación(dB)	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37	-1,37
Pérdidas difracción(dB)	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Pérdidas atmosféricas(dB)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,74E-05	4,88E-04	1,54E-02	3,08E-05	1,09E-04	1,94E-04	1,09E-03	3,45E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	1,50E-06	3,77E-06	1,95E-06	-5,72E-06	1,66E-06	2,49E-06	4,69E-06	5,13E-06
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	9,89E-05	4,92E-04	1,54E-02	2,51E-05	1,11E-04	1,96E-04	1,09E-03	3,46E-03
Indisponibilidad total(%) 0,01%	0,009	0,043	1,353	0,002	0,010	0,017	0,096	0,303
Indisponibilidad temporal anual (horas)								

Tabla 4.12 Resultados de la simulación del vano 1 para los equipos Trangolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 43,8 dBi

4.7.2 Diseño del segundo vano

La resolución de la imagen del perfil del segundo vano es de 6,125 m por pixel, que es el resultado de dividir la longitud del trayecto que son 4870 m entre el número de pixeles de la imagen, que son 800 pixeles de ancho.

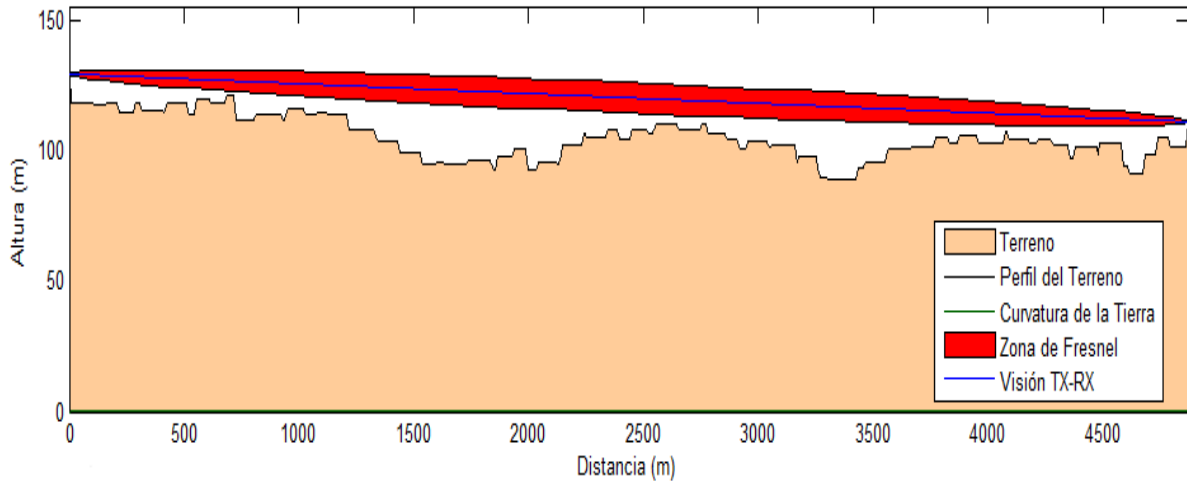


Figura 4.10 Relieve del segundo vano

La altura donde situamos la estación emisora de este vano es de 119 m y la altura donde situamos la estación receptora es de 101 m.

4.7.2.1 Parámetros de transmisión – recepción

La frecuencia utilizada en transmisión en este vano será 10,875 MHz. Las alturas de las antenas en este caso serán de 10 m tanto en transmisión como en recepción. La polarización será vertical como se explicó en el apartado (2.7.1.1), es decir se transmitirá con un ángulo de polarización de 0 grados.

Pérdidas internas TX(dB)	7,391
Altura antena TX(m)	10
Ganancia(dB)	48,3
Pérdidas internas RX(dB)	7,391
Altura antena RX(m)	10
Distancia TX-RX (m)	4870
Ángulo polarización(grados)	0
Frecuencia(GHz)	10,875

Tabla 4.13 Parámetros de Tx-Rx del segundo vano.

4.7.2.2 Parámetros básicos del radioenlace

Los parámetros básicos del radioenlace como el factor de ocurrencia de desvanecimiento, el parámetro K terrestre o los coeficientes K y α se calculan como se explicó en el apartado (4.7.1.2), y para el segundo vano los resultados de dichos parámetros son los que se pueden ver en la tabla 4.14.

Parámetro K terrestre	1,467
Kh	0,016987
Kv	0,016482
α h	1,218678
α v	1,167584
Rp(mm/h)	32
Factor ocurrencia desvanecimiento	0,074536

Tabla 4.14 Parámetros básicos de transmisión del segundo vano

4.7.2.3 Resultados de la simulación para el vano 2

Con los parámetros anteriores y los de los equipos realizamos la simulación del segundo vano, los resultados obtenidos se pueden ver en las siguientes tablas:

- Antena VHLPX2-11W/A de diámetro 0,6m/2ft (G=34,5 dBi)

Equipos	ALCATEL		PTP800		ECLIPLSE
	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM
Velocidad binaria (Mbps)	155	52,6	103,9	181,9	150
Potencia transmitida(dBm)	21	28	26	21	18
Potencia recibida(dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4	-73,5
Umbral de recepción (dBm)	-56,76	-49,76	-51,76	-56,76	-59,76
Margen(dB)	21,85	39,55	32,25	20,25	18,35
Pérdidas propagación(dB)	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92
Pérdidas difracción(dB)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	4,77E-02	8,11E-04	4,35E-03	6,90E-02	1,07E-01
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	5,04E-06	4,42E-06	9,46E-07	3,02E-06	3,68E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	4,77E-02	8,15E-04	4,35E-03	6,91E-02	1,07E-01
Indisponibilidad temporal anual (horas)	4,182	0,071	0,381	6,053	9,374

Tabla 4.15 Resultados de la simulación del vano 2 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 34,5 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Velocidad binaria (Mbps)	65	137	240	220	328	446	722	939
Potencia transmitida(dBm)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia recibida(dBm)	-83	-76	64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Umbral de recepción (dBm)	-55,76	-55,76	-58,76	-53,76	-53,76	-54,76	-55,76	-55,76
Margen(dB)	31,85	24,85	9,85	36,85	31,35	28,85	21,35	16,35
Pérdidas propagación(dB)	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92
Pérdidas difracción(dB)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	4,77E-03	2,39E-02	7,57E-01	1,51E-03	5,36E-03	9,53E-03	5,35E-02	1,69E-01
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	6,67E-06	4,72E-06	3,62E-08	3,49E-06	3,05E-07	1,67E-06	4,65E+00	7,06E-07
Indisponibilidad total(%) 0,01%	4,78E-03	2,39E-02	7,57E-01	1,51E-03	5,36E-03	9,53E-03	4,70E+00	1,69E-01
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,419	2,099	66,357	0,133	0,470	0,836	412,318	14,849

Tabla 4.16 Resultados de la simulación del vano 2 para los equipos Trangolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 34,5 dBi.

- Antena SHPX3-11W-3GR de diámetro 1m/3ft (G=38,4 dBi)

Equipos	ALCATEL	PTP800			ECLIPLSE
	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM
Velocidad binaria (Mbps)	155	52,6	103,9	181,9	150
Potencia transmitida(dBm)	21	28	26	21	18
Potencia recibida(dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4	-73,5
Umbral de recepción (dBm)	-48,96	-41,96	-43,96	-48,96	-51,96
Margen(dB)	29,65	47,35	40,05	28,05	26,15
Pérdidas propagación(dB)	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92
Pérdidas difracción(dB)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	7,92E-03	1,35E-04	7,23E-04	1,15E-02	1,77E-02
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	1,01E-06	5,34E-06	4,55E-06	2,33E-06	3,85E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	7,92E-03	1,40E-04	7,28E-04	1,15E-02	1,77E-02
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,695	0,012	0,064	1,004	1,555

Tabla 4.17 Resultados de la simulación del vano 2 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 38,4 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Velocidad binaria (Mbps)	65	137	240	220	328	446	722	939
Potencia transmitida(dBm)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia recibida(dBm)	-83	-76	64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Umbral de recepción (dBm)	-47,96	-47,96	-50,96	-45,96	-45,96	-46,96	-47,96	-47,96
Margen(dB)	39,65	32,65	17,65	44,65	39,15	36,65	29,15	24,15
Pérdidas propagación(dB)	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92
Pérdidas difracción(dB)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	7,93E-04	3,97E-03	1,26E-01	2,51E-04	8,89E-04	1,58E-03	8,49E-03	2,81E-02
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	4,45E-06	1,22E-06	2,02E-06	5,26E-06	4,31E-06	3,41E-06	1,26E-06	5,07E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	7,97E-04	3,97E-03	1,26E-01	2,56E-04	8,93E-04	1,58E-03	8,49E-03	2,81E-02
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,070	0,348	11,014	0,022	0,078	0,139	0,744	2,465

Tabla 4.18 Resultados de la simulación del vano 2 para los equipos Trangolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 38,4 dBi

- Antena VHLPX6-11-2GR/A de diámetro 1,8m/6ft (G=43,8 dBi)

Equipos	ALCATEL	PTP800			ECLIPLSE
	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM
Velocidad binaria (Mbps)	155	52,6	103,9	181,9	150
Potencia transmitida(dBm)	21	28	26	21	18
Potencia recibida(dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4	-73,5
Umbral de recepción (dBm)	-38,16	-31,16	-33,16	-38,16	-41,16
Margen(dB)	40,45	58,15	50,85	38,85	36,95
Pérdidas propagación(dB)	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92
Pérdidas difracción(dB)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	6,59E-04	1,12E-05	6,01E-05	9,53E-04	1,48E-03
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	4,65E-06	4,20E-06	5,17E-06	4,22E-06	3,53E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	6,64E-04	1,54E-05	6,53E-05	9,57E-04	1,48E-03
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,058	0,001	0,006	0,084	0,130

Tabla 4.19 Resultados de la simulación del vano 2 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 43,8 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Velocidad binaria (Mbps)	65	137	240	220	328	446	722	939
Potencia transmitida(dBm)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia recibida(dBm)	-83	-76	64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Umbral de recepción (dBm)	-37,16	-37,16	-40,16	-35,16	-35,16	-36,16	-37,16	-37,16
Margen(dB)	50,45	43,45	28,45	55,45	49,95	47,45	39,95	34,95
Pérdidas propagación(dB)	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92	126,92
Pérdidas difracción(dB)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	6,59E-05	3,30E-04	1,05E-02	2,12E-05	7,40E-05	1,32E-04	7,39E-04	2,34E-03
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	5,20E-06	5,16E-06	2,00E-06	4,64E-06	5,24E-06	5,34E-06	4,53E-06	2,59E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	7,11E-05	3,35E-04	1,05E-02	2,59E-05	7,92E-05	1,37E-04	7,44E-04	2,34E-03
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,006	0,029	0,916	0,002	0,007	0,012	0,065	0,205

Tabla 4.20 Resultados de la simulación del vano 2 para los equipos Trangolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 43,8 dBi

4.7.3 Diseño del tercer vano

La resolución de la imagen de simulación del tercer vano es de 12,75 m por pixel, que es el resultado de dividir la longitud del trayecto que son 10,200 m entre el número de pixeles de la imagen, que son 800 pixeles de ancho.

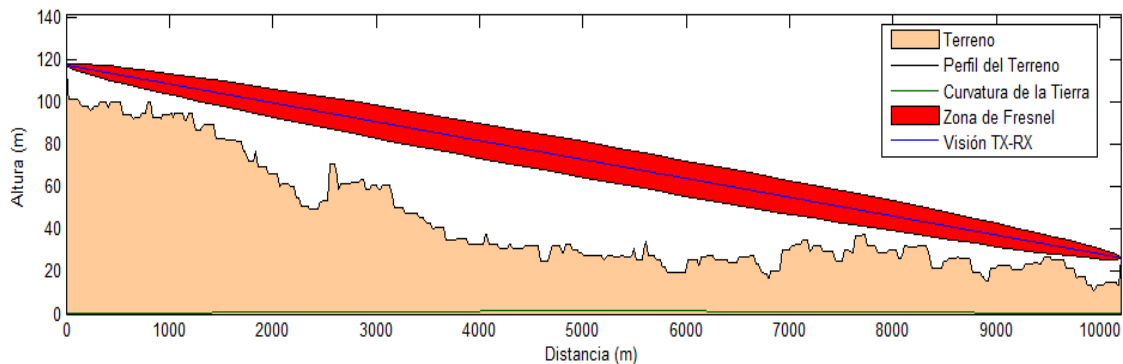


Figura 4.11 Relieve del tercer vano

El emisor se encuentra a 101 m de altura mientras que la estación receptora se encuentra a 20 m de altura.

4.7.3.1 Parámetros de transmisión – recepción

La frecuencia utilizada en transmisión en este vano será f1, es decir 10,7 MHz. Las alturas de las antenas en este caso serán de 10 m en transmisión y 13 m recepción. La polarización será horizontal como se explicó en el apartado (2.7.1.1), es decir se transmitirá con un ángulo de polarización de 90 grados.

Pérdidas internas TX(dB)	7,391
Altura antena TX(m)	10
Pérdidas internas RX(dB)	9,45830
Altura antena RX(m)	13
Distancia TX-RX (m)	10.200
Ángulo polarización(grados)	90
Frecuencia(GHz)	10,7

Tabla 4.21 Parámetros de TX-RX del segundo vano.

4.7.3.2 Parámetros básicos del radioenlace

Los parámetros básicos del radioenlace como el factor de ocurrencia de desvanecimiento, el parámetro K terrestre o los coeficientes K y α se calculan como se explicó en el apartado (4.7.1.2), y para el tercer vano los resultados de dichos parámetros son los que se pueden ver en la tabla 4.22.

Parámetro K terrestre	1,467
Kh	0,01598
Kv	0,01536
α h	1,22553
α v	1,17615
Rp(mm/h)	32
Factor ocurrencia desvanecimiento	0,53705

Tabla 4.22 Parámetros básicos de transmisión del tercer vano

4.7.3.3 Resultados de la simulación para el vano 3

- Antena VHLPX2-11W/A de diámetro 0,6m/2ft (G=34,5 dBi)

Equipos	ALCATEL	PTP800			ECLIPLSE
Modulaciones	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM
Velocidad binaria (Mbps)	155	52,6	103,9	181,9	150
Potencia transmitida(dBm)	21	28	26	21	18
Potencia recibida(dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4	-73,5
Umbral de recepción (dBm)	-67,55	-60,55	-62,55	-67,55	-70,55
Margen(dB)	12,73	30,43	23,13	11,13	9,23
Pérdidas propagación(dB)	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2
Pérdidas difracción(dB)	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	3,87E-01	6,57E-03	3,53E-02	5,60E-01	8,67E-01
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	1,14E-03	4,47E-06	6,18E-07	1,87E-03	3,47E-03
Indisponibilidad total(%) 0,01%	3,89E-01	6,57E-03	3,53E-02	5,62E-01	8,71E-01
Indisponibilidad temporal anual (horas)	34,059	0,576	3,097	49,249	76,327

Tabla 4.23 Resultados de la simulación del vano 3 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 34,5 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Velocidad binaria (Mbps)	65	137	240	220	328	446	722	939
Potencia transmitida(dBm)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia recibida(dBm)	-83	-76	64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Umbral de recepción (dBm)	-66,55	-66,55	-69,55	-64,55	-64,55	-65,55	-66,55	-66,55
Margen(dB)	22,73	15,73	0,73	27,73	22,23	19,73	12,23	7,23
Pérdidas propagación(dB)	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2
Pérdidas difracción(dB)	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	3,87E-02	1,94E-01	6,14E+00	1,23E-02	4,35E-02	7,73E-02	4,34E-01	1,37E+00
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	5,25E-06	5,63E-08	7,89E-01	8,20E-07	4,33E-07	1,85E-07	1,33E-03	7,20E-03
Indisponibilidad total(%) 0,01%	3,87E-02	1,94E-01	6,93E+00	1,23E-02	4,35E-02	7,73E-02	4,35E-01	1,38E+00
Indisponibilidad temporal anual (horas)	3,393	17,014	607,341	1,074	3,810	6,775	38,160	121,117

Tabla 4.24 Resultados de la simulación del vano 3 para los equipos Tringolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 34,5 dBi.

- Antena SHPX3-11W-3GR de diámetro 1m/3ft (G=38,4 dBi)

Equipos	ALCATEL	PTP800		ECLIPLSE	
Modulaciones	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM
Velocidad binaria (Mbps)	155	52,6	103,9	181,9	150
Potencia transmitida(dBm)	21	28	26	21	18
Potencia recibida(dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4	-73,5
Umbral de recepción (dBm)	-59,75	-52,9	-59,9	-59,75	-62,9
Margen(dB)	20,53	38,34	26,04	18,93	17,14
Pérdidas propagación(dB)	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2
Pérdidas difracción(dB)	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	6,43E-02	1,09E-03	1,85E-02	9,29E-02	1,44E-01
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	2,39E-07	3,24E-06	4,62E-06	1,45E-06	8,21E-08
Indisponibilidad total(%) 0,01%	6,43E-02	1,09E-03	1,85E-02	9,29E-02	1,44E-01
Indisponibilidad temporal anual (horas)	5,636	0,096	1,626	8,144	12,614

Tabla 4.25 Resultados de la simulación del vano 3 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 38,4 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Velocidad binaria (Mbps)	65	137	240	220	328	446	722	939
Potencia transmitida(dBm)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia recibida(dBm)	-83	-76	64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Umbral de recepción (dBm)	-58,9	-58,9	-61,9	-56,9	-56,9	-57,9	-58,9	-58,9
Margen(dB)	30,64	23,64	8,64	35,64	30,1	27,64	20,14	15,1
Pérdidas propagación(dB)	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2
Pérdidas difracción(dB)	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	6,43E-03	3,22E-02	1,02E+00	2,03E-03	7,21E-03	1,28E-02	7,21E-02	2,28E-01
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	4,54E-06	7,36E-07	4,43E-03	4,54E-06	4,17E-06	3,64E-07	2,04E-06	4,59E-08
Indisponibilidad total(%) 0,01%	6,43E-03	3,22E-02	1,02E+00	2,03E-03	7,21E-03	1,28E-02	7,21E-02	2,28E-01
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,564	2,823	89,712	0,178	0,632	1,122	6,320	19,986

Tabla 4.26 Resultados de la simulación del vano 3 para los equipos Trangolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 38,4 dBi

- Antena VHLPX6-11-2GR/A de diámetro 1,8m/6ft (G=43,8 dBi)

Equipos	ALCATEL	PTP800		ECLIPLSE	
Modulaciones	64QAM	QPSK	16QAM	64QAM	64QAM
Velocidad binaria (Mbps)	155	52,6	103,9	181,9	150
Potencia transmitida(dBm)	21	28	26	21	18
Potencia recibida(dBm)	-74	-84,7	-79,4	-72,4	-73,5
Umbral de recepción (dBm)	-48,95	-41,95	-43,95	-48,95	-51,95
Margen(dB)	31,33	49,03	41,85	29,73	27,83
Pérdidas propagación(dB)	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2
Pérdidas difracción(dB)	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	5,34E-03	9,08E-05	4,87E-04	7,72E-03	1,20E-02
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	4,93E-06	2,23E-06	1,28E-06	3,89E-06	1,04E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	5,34E-03	9,30E-05	4,88E-04	7,72E-03	1,20E-02
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,469	0,008	0,043	0,677	1,049

Tabla 4.27 Resultados de la simulación del vano 3 para los equipos Alcatel, PTP800 y Eclipse con antenas de ganancia 43,8 dBi.

Equipos	TRANGOLINK GIGA			FIBER AIR IP-20C CERAGON				
	QPSK	16QAM	256QAM	QPSK	8PSK	16QAM	64QAM	256QAM
Velocidad binaria (Mbps)	65	137	240	220	328	446	722	939
Potencia transmitida(dBm)	22	22	19	24	24	23	22	22
Potencia recibida(dBm)	-83	-76	64	-86	-80,5	-79	-72,5	-67,5
Umbral de recepción (dBm)	-47,95	-47,95	-50,95	-45,95	-45,95	-46,95	-47,95	-47,95
Margen(dB)	41,33	34,33	19,33	46,33	40,83	38,33	30,83	25,83
Pérdidas propagación(dB)	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2	133,2
Pérdidas difracción(dB)	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Pérdidas lluvia 0,01% (dB)	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28	6,28
Pérdidas atmosféricas(dB)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Indisponibilidad debido a equipos(%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading(%)	5,35E-04	2,68E-03	8,48E-02	1,69E-04	6,00E-04	1,07E-03	6,00E-03	1,90E-02
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	1,50E-06	4,94E-06	1,66E-07	1,09E-06	1,78E-06	3,18E-06	4,71E-06	5,02E-06
Indisponibilidad total(%) 0,01%	5,36E-04	2,69E-03	8,48E-02	1,70E-04	6,02E-04	1,07E-03	6,00E-03	1,90E-02
Indisponibilidad temporal anual (horas)	0,047	0,235	7,429	0,015	0,053	0,094	0,526	1,663

Tabla 4.28 Resultados de la simulación del vano 3 para los equipos Trangolink giga y Fiber air IP-20C con antenas de ganancia 43,8 dBi

4.8 Solución adoptada

Una vez se ha diseñado el radioenlace y se han obtenido los resultados de las simulaciones para distintos equipos y distintas antenas, se debería elegir una opción para obtener la solución que más se adecue a las necesidades de nuestro radioenlace.

Nuestro diseño es para un radioenlace de servicios de emergencia, luego tendremos que buscar una solución que nos proporcione una alta disponibilidad, con una alta calidad en la transmisión y un buen margen de fading para que los posibles desvanecimientos que se den no influyan en las prestaciones del enlace.

En primer lugar tenemos que decidir que antenas se usarán en cada vano, para el primero y el segundo, se decidieron utilizar antenas de 1m de diámetro con ganancia de 38,4 dB, se valoró la opción de realizarlo con antenas más pequeñas ya que eran tramos de poca longitud sin apenas pérdidas por difracción, por ejemplo con una de 0,6 m de diámetro y 34,5 dB de ganancia, teníamos una indisponibilidad bastante grande, sobre todo para las modulaciones más altas, de mayor capacidad, que no cumplían con los objetivos de disponibilidad, por lo tanto se optó con usar las antenas de 38,4 dB (1 m de diámetro) que nos permitían elegir modulaciones más altas en el caso que fuese necesario, sin tener una gran indisponibilidad. Para el tercer vano se utilizaron antenas de 43,8 dB de ganancia (1,8 m de diámetro), ya que este tramo es de mayor longitud, por lo tanto tiene mayores pérdidas por propagación y también tenemos ligeras pérdidas por difracción por lo cual estas pérdidas de señal las compensamos usando antenas de mayor ganancia.

Una vez elegidas las antenas, el siguiente paso es elegir qué equipo de transmisión y con qué modulaciones se obtienen resultados más óptimos atendiendo a nuestras necesidades. De los equipos con los que se ha realizado las simulaciones, en primer lugar descartamos el equipo Trangolink Giga, ya que su potencia de transmisión es pequeña por lo que se obtiene un margen de fading menor, así como tiene una indisponibilidad bastante alta en comparación con otros equipos de mayor capacidad. También se descartaron los equipos Alcatel y Eclipse, aparte de que únicamente tiene una modulación disponible para nuestro ancho de banda y banda de frecuencias utilizada, la potencia de transmisión era pequeña con lo que se tenía un margen de fading pequeño, aunque es cierto que la capacidad cumplía con los objetivos que nos habíamos marcado se descartaron estas soluciones ya que con otros equipos con la misma modulación se obtiene una mejor capacidad y mejor disponibilidad.

Tras descartar estos equipos nos quedamos con 2 soluciones posibles que a priori cumplían con los objetivos establecidos, los PTP800 de Cambium networks y la serie Fiber Air IP-20C de Ceragon, si realizamos una comparativa entre ambos vemos que por ejemplo para una modulación 64QAM se tiene para PTP800 una velocidad binaria de 181,9 Mbps mientras que para el equipo Fiber Air IP-20C se tiene 722 Mbps, lo mismo pasa con las otras modulaciones, mientras que si nos fijamos en la disponibilidad, están bastante a la par, aunque si tenemos en cuenta la potencia transmitida en cada equipo es más alta para los PTP800 con lo que el margen obtenido también es ligeramente mayor, aunque la diferencia es mínima.

El equipo que mejor cumple con los objetivos de nuestro sistema es el Fiber Air IP-20C de Ceragon, aunque es cierto que con el PTP800 también cumplimos con creces los objetivos de disponibilidad, nos vemos algo justos en cuanto a capacidad, por eso se decidió utilizar el equipo de Ceragon debido a los avances tecnológicos que introduce este equipo, los cuales nos permiten aumentar la fiabilidad del sistema así como transmitir con velocidades muy altas con una gran disponibilidad, que eran de los objetivos principales a tener en cuenta en el diseño del radioenlace. Aunque este equipo tiene la opción de utilizar modulación adaptativa, no es necesario hacer uso de ella ya que cumplimos todos los objetivos con un margen lo suficientemente grande para hacer frente a posibles problemas que puedan surgir, por lo tanto se podría transmitir con una modulación QPSK la cual transmite por encima de 200 Mbps, tiene un margen de fading por encima de los 35 dB en todos los vanos, así como una indisponibilidad temporal anual de todo el radioenlace menor de 0,07 horas, descartando así modulaciones más altas que introducen una disponibilidad bastante mala.

	VANO 1	VANO 2	VANO 3
Velocidad binaria (Mbps)	220	220	220
Potencia transmitida (dBm)	24	24	24
Potencia recibida (dBm)	-52,76	-86	-86
Umbral de recepción (dBm)	-86	-45,96	-45,95
Margen (dB)	35,9	44,65	46,33
Perdidas propagación (dB)	123,66	126,92	133,2
Perdidas difracción (dB)	-1,37	0,37	1,06
Perdidas lluvia 0,01% (dB)	2,66	4,61	6,28
Perdidas atmosféricas (dB)	0,05	0,08	0,16
Indisponibilidad debido a equipos (%)	9,99E-03	9,99E-03	9,99E-03
Indisponibilidad debida a fading (%)	3,70E-04	2,51E-04	1,69E-04
Indisponibilidad lluvia (%) 0,01%	3,40E-06	5,26E-06	1,09E-06
Indisponibilidad total (%) 0,01% *	3,73E-04	2,56E-04	1,70E-04
Indisponibilidad total temporal anual (horas) *	0,033	0,022	0,015

Tabla 4.29 Resultados de la solución elegida (Fiber Air IP-20C de Ceragon con modulación QPSK)

*No se ha considerado la indisponibilidad debido a equipos

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha diseñado un radioenlace digital entre el parque central de bomberos de Valencia y el centro de emergencias situado en la Eliana.

Tras realizar un estudio de la orografía del terreno, se seleccionaron 5 equipos de diferentes marcas para realizar una comparativa entre ellos y elegir con cuales se consiguen soluciones más óptimas de acuerdo con nuestros objetivos de diseño establecidos. Posteriormente se calcularon los parámetros necesarios para realizar la simulación.

Una vez calculados todos los parámetros del radioenlace, se procedió a realizar las simulaciones con el objetivo de estudiar la viabilidad del sistema. Para ello se utilizó un programa sencillo de simulación de radioenlaces llamado RadioSim.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se llegó a la conclusión que la mejor solución en cuanto a calidad en la comunicación y a disponibilidad se consigue con el equipo FiberAir IP-20C de Ceragon, transmitiendo con la modulación QPSK, que era la solución con la que se conseguía una mejor disponibilidad, obteniendo una capacidad de 220 Mbps, que está por encima de los 140 Mbps que nos recomienda el CNAF de acuerdo con la banda de frecuencias utilizada.

En cuanto a las antenas a utilizar en cada vano, se concluyó que la mejor solución era utilizar antenas de 38,4 dBi para los vanos 1 y 2 ya que con ellas se conseguían cumplir con los objetivos establecidos y un uso de antenas de mayor ganancia incrementaría el coste así como la contaminación visual, en el vano 3 se utilizó antenas de 43,8 dBi, debido a que en este último vano la distancia entre el transmisor y el receptor era más grande, con lo que se tenía una atenuación por espacio libre y por lluvia ligeramente mayor con respecto a los otros vanos, por lo tanto se optó por utilizar antenas de mayor ganancia en este vano para compensar este aumento de pérdidas.

Finalmente, decir que la realización de un trabajo de este tipo, acerca mucho al alumno al diseño de sistemas que se asemejan a la realidad, trabajando con equipos reales, y comprobando que el diseño de un radioenlace es mucho más que resolver un problema teórico. Aun así quedan varias cosas para hacerlo más real como puede ser la realización del presupuesto, ya que ha sido imposible realizarlo porque los fabricantes no tienen disponible el precio de los equipos, el acercamiento a los fabricantes para conocer mejor sus equipos y el conocimiento de la situación de la infraestructura ya instalada, como las torres de telecomunicaciones, para lo que habría de disponer de medios para ir allí y comprobarlo.

5.2 Líneas Futuras

En cuanto a las líneas futuras, en los últimos años se han ido fabricando equipos con avances tecnológicos importantes, como la codificación y modulación adaptativa para reducir tanto los errores en la transmisión como la probabilidad de que caiga una conexión, como la tecnología Header De-Duplication, que consiste en modificar las cabeceras y sustituirlas por etiquetas y así reducir la carga aumentando el caudal efectivo del sistema o como la tecnología XPIC (cancelación de la interferencia contrapolar), el cual utiliza doble polarización en radiofrecuencia sobre un único canal de frecuencia. Todas estas características están empezando a implantarse en los nuevos equipos de transmisión, y aunque muchas de ellas están aún en desarrollo y son de un coste muy elevado, se espera que se vayan asentando en los próximos años. Estas nuevas tecnologías serían interesantes para el diseño de este tipo de radioenlaces en los cuales se necesita minimizar los errores, aumentar la disponibilidad y tener una gran capacidad de transmisión.

Referencias bibliográficas

- [1] José María Hernando Rábanos, *Transmisión Por Radio*, Séptima Edición.
- [2] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R P.525-2*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-2-199408-I!!PDF-S.pdf
- [3] José Manuel Albornoz, *Radioenlaces Digitales*, https://www.academia.edu/3492817/Radioenlaces_Digitales?auto=download
- [4] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R P.526-13*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-13-201311-I!!PDF-S.pdf
- [5] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R P.676-10*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-I!!PDF-S.pdf
- [6] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R P.833-8*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-8-201309-I!!PDF-S.pdf
- [7] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R P.530-16*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-16-201507-I!!PDF-E.pdf
- [8] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R P.837*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-6-201202-I!!PDF-S.pdf
- [9] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R P.838*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-S.pdf
- [10] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R F.1703-0*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.1703-0-200501-I!!PDF-S.pdf
- [11] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R F.1668-1*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.1668-1-200701-I!!PDF-S.pdf
- [12] Jorge García Vega, *Diseño y realización de una herramienta de simulación de radioenlaces utilizando Matlab*, Trabajo final de grado, Universidad politécnica de Valencia, 2015
- [13] Juan José Murillo Fuentes, Radioenlaces terrenales de servicio fijo, <http://personal.us.es/murillo/docente/radio/documentos/tema8.pdf>
- [14] Profiler Online, <http://www.heywhatsthat.com/profiler.html>
- [15] Heywhatsthat Profiler, Technical FAQ, http://www.heywhatsthat.com/techfaq.html#get_elevation_data
- [16] United States Geological Survey USGS, <http://www.usgs.gov/>
- [17] Cuadro Nacional de Atribucion de Frecuencias (CNAF) www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/Paginas/CNAF.aspx
- [18] Notas UN CNAF. <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/CNAF/notasUN2013.pdf>
- [19] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R F.387*, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.387-12-201203-I!!PDF-S.pdf

- [20] Ceragon, FibeAir IP-20C Technical Description,
http://www.airbroadband.com/fileadmin/user_upload/Deutsch/Datenbl%C3%A4tter/Ceragon/Ceragon_FibeAir_IP-20C_Technical_Description_C7.5_ETSI_Rev_A.06.pdf
- [21] Alcatel-Lucent 9500 Microwave Cross-Connect,
http://www.daywireless.com/dealer-downloads/broadband_connectivity/9500_MXC_DS.pdf
- [22] Cambium Network, PTP800,
http://www.inter-radios.com/image.ashx?i=81183.pdf&fn=PTP80005_SS_US_022012_ESM.pdf
- [23] TrangoLink Giga 11GHz
<http://www.meridianmicrowave.com/TrangoLINK-Giga11.pdf>
- [24] Commscope,
<http://es.commscope.com/Product-Catalog/Wireless/Product/Antenna-Systems/>
- [25] Cable Coaxial TCF500,
<http://www.totoku.com/products/cables-connector/cat1/microwave-coaxial-cable-assembly.php>
- [26] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT, *Recomendación UIT-R P.453-11*,
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-11-201507-1!!PDF-E.pdf