

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL

RADIOENLACE DE LARGA DISTANCIA PARA
REDES DE APLICACIONES CIENTIFICAS

Curso 2011/2012

Alumno/a:

Salvador Hernández García

Director/es:

Dr. José Antonio Gázquez Parra
Dra. Nuria Novas Castellano



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Departamento de Lenguajes y Computación



TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL
POSGRADO EN INFORMÁTICA

RADIOENLACE DE LARGA DISTANCIA PARA
REDES DE APLICACIONES CIENTÍFICAS

Salvador Hernández García

Dirigida por: Dr. José Antonio Gázquez Parra y Dra. Nuria Novas Castellano

Almería, Septiembre 2012

TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INFORMÁTICA INDUSTRIAL
POSGRADO EN INFORMÁTICA



RADIOENLACE DE LARGA DISTANCIA PARA
REDES DE APLICACIONES CIENTÍFICAS

por
Salvador Hernández García

Para la obtención del
Título del Máster en Informática Industrial
Posgrado en Informática

Director

Directora

Autor

Dr. José Antonio Gázquez Parra

Dra. Nuria Novas Castellano

Salvador Hernández García

A Mar, Marina y David,
mi vida.

A todos los que creen
en el esfuerzo, la superación
y el trabajo.

Radioenlace de larga distancia para redes de aplicaciones científicas

Índice

I. Introducción	1
A. Objetivos del proyecto	1
B. Estación de medida de Sierra Filabres	2
C. Radioenlace Universidad de Almería – Serra Filabres	2
D. Tecnologías disponibles	4
Banda de frecuencias	4
Frecuencia seleccionada. Banda 5.8 GHz.....	4
Tecnología OFDM	5
E. Selección del radioenlace	6
F. Selección de antenas	7
II. Cálculo y estudio del radioenlace	7
A. Descripción física del radioenlace.....	7
B. Pérdidas en espacio abierto – Friss	11
C. Balance de potencias	11
Balance del transmisor	11
Balance del enlace	12
D. Pérdidas por obstáculos – Fresnel	13
E. Atenuación por gases y vapores atmosféricos	13
F. Atenuación por hidrometeoros	14
G. Resultado del cálculo del radioenlace.....	14
III. Red de comunicaciones	15
A. Descripción de la red	15
B. Configuración del radioenlace	17
C. Router Ubuntu, IPTables	18
IV. Instalación y pruebas del radioenlace	20
A. Descripción del radioenlace	20
B. Emplazamiento de las antenas	20
C. Toma de tierra y protección de sobretensiones atmosféricas	21
D. Polarización y alineación de las antenas	22

E. Aislamiento al agua	25
F. Pruebas de funcionamiento.....	26
V. Conclusiones	27
VI. Futuros trabajos	27
VII. Referencias	28

Índice de figuras

1. Estación de captación de medidas sísmicas y de señales electromagnéticas de baja frecuencia de Sierra de los Filabres.	2
2. Ejemplo de subportadoras OFDM	5
3. Esquema de un transmisor OFDM.	5
4. Radioenlace seleccionado: Proxim Tsunami QB8100.	7
5. Antenas parabólicas seleccionadas: RadioWaves de 60 cm con iluminador de doble polaridad.	7
6. Radioenlace Universidad de Almería – Estación Sierra Filabres	8
7. Ubicación del enlace en la Universidad de Almería	9
8. Ubicación del enlace en Sierra de los Filabres	10
9. Perfil topográfico del radioenlace	10
10. Esquema del balance de potencias del radioenlace	12
11. Forma de la señal, 1ª zona de Fresnel	13
12. Atenuación debida a gases atmosféricos.	13
13. Esquema general de red	12
14. Script IPTables implementado	19
15. Radioenlace Universidad de Almería – Estación Sierra Filabres	20
16. Izquierda: Antena parabólica sin protección Derecha: Antena parabólica con el radomo protector instalado.	21
17. Ubicación equipo y antena en la cubierta de la Universidad de Almería	21
18. Ubicación equipo y antena en Sierra de los Filabres.	22
19. Protector contra sobretensiones atmosféricas	22
20. Iluminador parabólico con doble polaridad, vertical y horizontal.	17
21. Esquema sistema MIMO 3x3	23
22. Azimut enlace Universidad-Sierra Filabres y Calar Alto	19
23. Comprobando la alineación de la antena de Sierra Filabres.	19

24. Pantalla del test de enlace, después de alinear la antena de Sierra Filabres, 2º fase.	24
25. Pantalla del test de enlace, después de realinear la antena de la Universidad de Almería, ajuste final.	25
26. Protectores de conexión impermeables	25
27. Impermeabilizando con cinta vulcanizable	26
28. Estadísticas de conexión, conectado a 52 Mbps	26
29. Pantalla principal de información del radioenlace	27

Índice de tablas

1. Limitaciones de los sistemas inalámbricos en la banda de 5.8 GHz.	4
2. Características físicas del radioenlace	8
3. Coordenadas geográficas enlace Universidad de Almería	9
4. Coordenadas geográficas enlace Sierra Filabres.	9
5. Características y resultados del cálculo del radioenlace.	14
6. Tabla NAT del radioenlace	17
7. Tabla NAT del router Ubuntu	18
8. Características físicas del radioenlace.	20
9. Características y resultados del cálculo del radioenlace.	23

Radioenlace de larga distancia para Redes de Aplicaciones Científicas

Salvador Hernández García
Máster en Informática Industrial
Postgrado en Informática
Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería.

Resumen: — En la actividad científica y de investigación es necesario en muchos casos ubicar estaciones de medida y toma de datos en diferentes lugares, habitualmente alejados de los centros de investigación, donde se realiza el estudio y análisis y correlación de dichas medidas y datos. Si las instalaciones científicas de toma de datos se encuentran en entornos alejados de las zonas habitadas, como pueden ser entornos naturales, de montaña o zonas rurales, no es posible el uso de las redes públicas de telecomunicaciones para acceso a la información desde los centros de investigación. Una solución a este problema es la instalación de radioenlaces entre las estaciones científicas de medida y los centros de investigación. Este trabajo fin máster estudia, calcula e implementa un radioenlace de larga distancia entre la estación de medidas sismológicas y el observatorio de medidas de ondas electromagnéticas de baja frecuencia ubicados en la Sierra de los Filabres (Almería) y la Universidad de Almería, así como los sistemas y reglas de enrutamiento para el tráfico transparente de diferentes redes de datos.

Abstract: — In scientific activity and investigation is necessary in many cases, establish measurement station and data acquirement at different place, usually far away of the investigation centers, where the study and analysis of the data are made. If the scientific station of data acquirement are place far away from the habited zone, as natural place, mountain and rural zone, is not possible to use the public communication network for the access of data from the investigation centers. A solution of this problem is the installation of radio link between the scientific measurement station and the investigation center. This master final work, study, calculate and implemented a long distance radio link between the seismologic measurement station and the low frequency electromagnetic wave measurement, placed in Sierra of Filabres (Almeria) and the University of Almería, as well as the system and rules of traffic routing between the different data networks.

Palabras Clave: — Radioenlace, microondas, frecuencia, potencia, transmisor, receptor, antena, radioeléctrico, cmt, cnaf, vano, Friis, Fresnel, pire, dfs, tpc, mimo, rsl, inalámbrico, sísmico, sismológico, networking.

I. INTRODUCCIÓN

A. Objetivos del Proyecto

Los objetivos del presente trabajo fin de máster son el diseño, cálculo, instalación, puesta en marcha y evaluación de un radioenlace digital en la banda de 5 GHz entre la Universidad de Almería y la estación de captación de medidas sísmicas y de señales electromagnéticas de baja frecuencia ubicada en las zona de Calar Alto en la Sierra de los Filabres de Almería y de una red de tráfico de datos científicos en tiempo real.

El trabajo fin de máster, por tanto, se ha realizado en dos vertientes. Por un lado la parte teórica y de investigación, donde se han estudiado como se diseña y se calcula el radioenlace, así como la red necesaria para la correcta interconexión de todos los equipos captadores de información y los diferentes destinatarios de la misma. Y la parte práctica, donde se ha realizado la instalación física del radioenlace, se ha configurado para su puesta en marcha y se ha evaluado su funcionalidad y prestaciones. El hecho de poder realizar en la práctica la instalación de un radioenlace y su conexión, desde su origen hasta su evaluación, superando todos los problemas surgidos, tanto en la configuración de los equipos y de la red, como en el propio proceso físico de la instalación, ha sido una experiencia muy satisfactoria, obteniendo unos conocimientos teóricos y prácticos de gran utilidad.

B. Estación de medida de Sierra de Filabres

En la zona de Calar Alto en la Sierra de los Filabres de Almería, se encuentra ubicada una estación de captación de medidas sísmicas de la Red Sismológica Andaluza perteneciente al Instituto Andaluz de Geofísica. La ubicación de la estación es fruto de la necesidad de que los sensores sísmicos se encuentren alejados de lugares habitados y del tráfico rodado, así como de líneas eléctricas. En dicha estación se realiza la captación de señales sísmicas, que deben de ser analizadas y correlacionadas en tiempo real con las provenientes de las restantes estaciones sismológicas para el estudio y predicción de seísmos.



Figura 1. Estación de captación de medidas sísmicas y de señales electromagnéticas de baja frecuencia de Sierra de los Filabres.

En colaboración con el Instituto Andaluz de Geofísica, la Universidad de Almería y la de Granada, han instalado en la misma estación la primera unidad en España de captación de señales

electromagnéticas de baja frecuencia ELF. Dentro del Proyecto de Investigación de Excelencia de la Junta de Andalucía FQM-03280, “Estudio de Fenómenos Electromagnéticos Naturales para el Diagnóstico del Medio Ambiente”. En él se van a medir las señales de Extremadamente Baja Frecuencia [1] (ELF1, bandas de 3 Hz a 30 Hz y de 30 a 300 Hz) generadas por la Tierra, considerando a ésta una cavidad resonante, para su posterior relación con el diagnóstico del medio ambiente. Los datos generados por dichos captadores deben ser estudiados y relacionados posteriormente por los correspondientes centros de investigación implicados en el proyecto.

Surge por tanto, la necesidad de comunicar en tiempo real y de manera fiable la estación de medida de Sierra Filabres con el Instituto Andaluz de Geofísica, la Universidad de Granada y la Universidad de Almería. Debido a la ubicación de la misma, no existe la posibilidad de conexión con redes públicas de comunicaciones. Para solventar este problema, se decide la instalación de un radioenlace entre la estación de medida de Sierra Filabres y la Universidad de Almería, con el suficiente ancho de banda para transmitir en tiempo real y con fiabilidad, toda la información generada por los distintos captadores ubicados en la estación.

C. Radioenlace Universidad de Almería – Calar Alto

La estación de medida de Sierra Filabres se encuentra a 43.2 kilómetros de la Universidad de Almería y a una altura de 1600 metros. Entre ambas ubicaciones hay visión directa y limpia de obstáculos. Debido a la gran distancia entre ambas, el radioenlace debe ser calculado, seleccionado e instalado con precisión y esmero. Esto nos obliga a investigar las diferentes tecnologías disponibles, para seleccionar las más adecuadas para conseguir en enlace permanente y fiable, con la velocidad de transmisión suficiente para cubrir las necesidades actuales y futuras.

D. Tecnologías disponibles

Al plantear la instalación de un radioenlace hay que realizar diferentes estudios previos para determinar cuestiones tales como la banda de frecuencias a utilizar, las tecnologías de transmisión, los equipos y sus prestaciones, las antenas, etc. Estas cuestiones son de vital importancia y en función de la elección realizada, el radioenlace será o no viable, y sus prestaciones y fiabilidad serán o no, las adecuadas. En los próximos epígrafes se analizarán las bandas de frecuencias disponibles para la implementación de enlaces inalámbricos, así como las tecnologías que se han seleccionado, y que definirán al radioenlace.

Banda de frecuencias

El espectro radioeléctrico es limitado y escaso, por lo que es necesario optimizar su uso, de tal manera que se pueda utilizar por el mayor número posible de servicios con el mínimo de interferencias entre los mismos [2]. El espectro radioeléctrico se divide en bandas de frecuencias a las que se le atribuyen los diferentes servicios radioeléctricos, así como sus especificaciones de funcionamiento y sus limitaciones, de tal manera que los diversos servicios puedan coexistir sin interferirse unos con otros.

La gestión del espectro radioeléctrico se realiza a través de organismos de regulación que van desde el ámbito internacional (*ITU - International Telecommunication Union*), al ámbito regional (*CEPT - Conference of European Post and Telecommunications Administrations* y *ETSI - European Telecommunications Standards Institute*), y al ámbito nacional. En España el organismo encargado de la gestión del espectro radioeléctrico es la CMT (Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones) y se regula en el CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias).

Dentro de las atribuciones de servicios asignadas a las distintas bandas de frecuencias, esta la

realización de radioenlaces. Existen bandas de frecuencias que necesitan ser asignadas previamente y que están sujetas a un canon de servicio, y bandas denominadas de uso común, que pueden ser utilizadas por todo el mundo, siempre que se cumplan los requisitos establecidos por las normas específicas de cada banda. El uso común no garantiza la protección frente a otros servicios legalmente autorizados ni puede causar perturbaciones a los mismos.

En principio, la intención es que el radioenlace en proyecto utilice alguna de las frecuencias de uso común disponibles, siempre y cuando cumplan con las necesidades del mismo. Se ha realizado un estudio de las bandas de frecuencias disponibles para estos propósitos y se ha elegido la que más se ajusta a las necesidades del proyecto.

Banda de 2.4 GHz. (CNAF: UN-85)

La banda de frecuencias 2400 – 2483.5 MHz, designada en el Reglamento de Radiocomunicaciones para aplicaciones ICM (Aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas) podrá ser utilizada también para los siguientes usos:

- Sistemas de transmisión de datos de banda ancha y de acceso inalámbrico a redes de comunicaciones electrónicas incluyendo redes de área local. Potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) máxima de 100 Mw. Características técnicas de los equipos según especificación ETSI EN 300 328. Esta utilización se considera de uso común.
- Dispositivos genéricos de baja potencia en recintos cerrados y exteriores de corto alcance, incluyendo aplicaciones de video. Potencia isotrópica radiada equivalente máxima de 10 Mw. Características técnicas de los equipos según especificación ETSI EN 300 440. Esta utilización se considera de uso común.

Banda de 5 GHz. (CNAF: UN-128)

Las bandas de frecuencia indicadas seguidamente podrán ser utilizadas por el servicio móvil en sistemas y redes de área local de altas prestaciones, de conformidad con las condiciones que se indican a continuación. Los equipos utilizados deberán disponer del correspondiente certificado de conformidad de cumplimiento con la norma EN 301 893 o especificación técnica equivalente.

- Banda 5150 – 5350 MHz.

Sistemas de acceso inalámbrico incluyendo comunicaciones electrónicas y redes de área local en el interior de recintos. Potencia isotrópica radiada equivalente máxima de 200 MW.

Control de potencia (TPC - *Transmit Power Control*) con factor de reducción de 3 dB. Técnicas de selección dinámica de frecuencias (DFS - *Dynamic Frequency Selection*). Esta utilización se considera de uso común.

- Banda 5470 - 5725 MHz.

Sistemas de acceso inalámbrico incluyendo comunicaciones electrónicas y redes de área local en el interior o exterior. Potencia isotrópica radiada equivalente máxima de 1 W. Técnicas Control de potencia con factor de reducción de 3 dB. Técnicas de selección dinámica de frecuencias. Esta utilización se considera de uso común.

Banda de 5.8 GHz. (CNAF: UN-143).

Los sistemas de acceso inalámbrico con distintas capacidades de movilidad del terminal y diferentes configuraciones de arquitectura de red, incluyendo aquellos con tecnologías de banda ancha podrán funcionar dentro de la banda de aplicaciones ICM de 5.8 GHz (5725-5875 MHz), en las siguientes subbandas de frecuencia: 5725-5795 MHz y 5815-5855 MHz.

Las limitaciones impuestas a estos servicios se recogen en la siguiente tabla:

Parámetro	P-NP	P2P	Malla	Desde y hacia cualquier punto
Max. Potencia media PIRE(1) (dBm)	36	36	33	33
Máx. densidad media de potencia PIRE (dBm/MHz)	23	23	20	20
Rango TPC (dB)	12	12	12	12

Tabla 1. Limitaciones de los sistemas inalámbricos en la banda de 5.8 GHz.

Para enlaces punto a punto (P2P - *peer-to-peer*). Potencia isotrópica radiada equivalente máxima de 4 W. Control de potencia con factor de reducción de 12 dB. Técnicas de selección dinámica de frecuencias. Esta utilización se considera de uso común.

Frecuencia seleccionada. Banda 5.8 GHz

Dentro de las bandas de frecuencia de uso común, se ha seleccionado la banda de 5.8 GHz para ser usada por el radioenlace a instalar entre la Universidad de Almería y la estación de Sierra Filabres. La elección de esta banda esta motivada por dos de las características de la misma:

1. La limitación de la potencia isotrópica radiada equivalente es la más alta de todas las bandas disponibles, y dado que la distancia a cubrir por el enlace punto a punto es de 43.2 Km es conveniente que la potencia sea la mayor posible.
2. Al ser una frecuencia alta, 5.8 GHz su uso no está saturado por el momento, como puede ocurrir con la banda de 2.4 GHz. Para una banda de uso común es interesante que este poco ocupada en previsión de posibles interferencias debidas a otros equipos operando en la misma banda.

Tecnología OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Dentro de las tecnologías de telecomunicación que se ofrecen hoy día, una de las que ha logrado un gran desarrollo es OFDM [3], siendo utilizada por los sistemas de telecomunicación más demandados y de mayores prestaciones y robustez del mercado. Por ello, OFDM es una de las tecnologías que debe ser incorporada al radioenlace a instalar entre la Universidad de Almería y la estación de Sierra Filabres.

OFDM es una técnica de comunicación que consiste en utilizar un número grande de portadoras equiespaciadas en frecuencia y moduladas cada una de ellas, de forma que la información a transmitir se reparte entre las

mismas [4], ver figura 2. Todas las portadoras utilizadas, ocuparán el ancho de banda del canal de transmisión y cada una de ellas formará un subcanal de tal modo que la suma de la información contenida en cada uno de estos subcanales será igual a la información a transmitir.

En OFDM el flujo de datos es dividido en N flujos paralelos [5], cada uno con una tasa $1/N$ de la original. A continuación cada flujo es modulado por una subportadora y combinado usando la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT) obteniendo la señal en el dominio del tiempo a transmitir. El proceso en recepción es el inverso, aplicando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener las diferentes subportadoras.

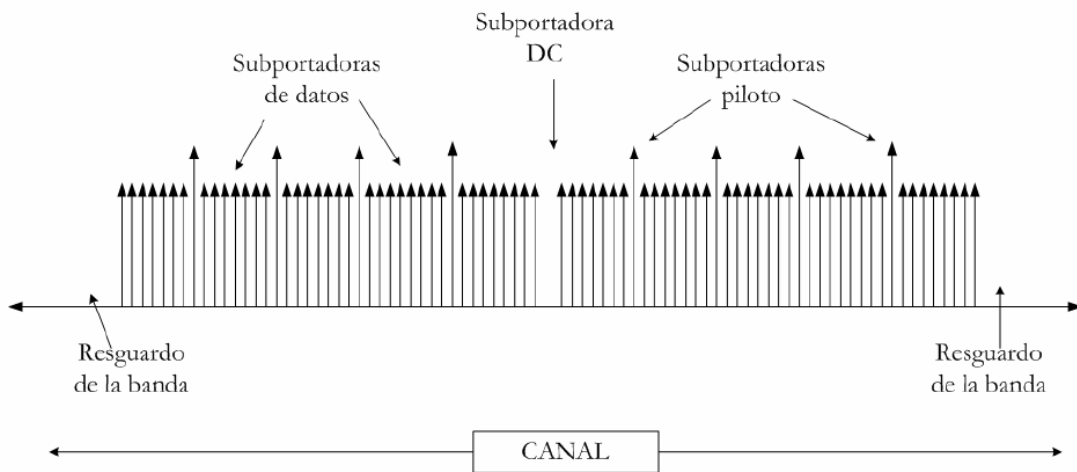


Figura 2. Ejemplo de subportadoras OFDM.

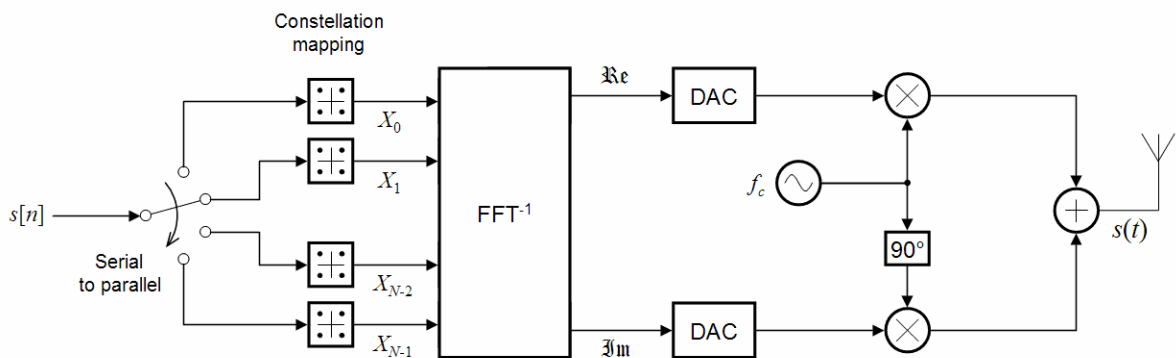


Figura 3. Esquema de un transmisor OFDM.

Como cada símbolo OFDM está constituido por la suma de los N símbolos contenidos en las portadoras durante el tiempo de símbolo de cada portadora, por tanto la duración de un símbolo OFDM es igual a la duración de símbolo de cada portadora. Cuanto mayor sea el número de portadoras mayor será la duración del símbolo OFDM y por lo tanto más robusto frente a desvanecimientos de la señal e interferencias. La baja velocidad de símbolo de OFDM, también permite establecer un intervalo de guarda entre símbolos, de tal manera que existirá un intervalo de tiempo vacío, en el que no se transmitirá información. En entornos con señales multirrayecto, no habrá interferencia entre símbolos siempre y cuando el retardo entre los diferentes ecos que lleguen al receptor sea inferior al intervalo de guarda. Como consecuencia, las comunicaciones con OFDM son muy robustas frente a la propagación multirrayecto. Además, permite realizar redes de frecuencia única (SFN – Single Frequency Network) donde la señal es recibida y transmitida en la misma frecuencia por todos los repetidores de una zona, con el consiguiente aprovechamiento del espectro de frecuencias.

Todas las características enumeradas anteriormente han hecho que OFDM sea un sistema de transmisión muy utilizado en la actualidad por diferentes servicios de telecomunicaciones, como son: ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), TDT (Televisión Digital Terrestre), WLAN (*Wireless LAN*), WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), PLC (*Power Line Communication*), DAB (*Digital Audio Broadcasting*), telefonía móvil 4G – LTE (*Long Term Evolution*), etc.

Cada una de las subportadoras que ocupan un canal OFDM deben ser modulas para transmitir el flujo de información que le corresponde, ver figura 3. Las modulaciones que se utilizan habitualmente son BPSK (*Binary Phase Shift Modulation*),

QPSK (*Quadrature Phase Shift Modulation*) y QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

E. Selección del radioenlace

Una vez estudiados los aspectos previos a decidir a la hora de instalar un radioenlace, llega la hora de seleccionar que equipos de los disponibles en el mercado cumple con los requisitos impuestos al radioenlace que va a ser instalado. Como se ha visto anteriormente, el equipo a seleccionar debe de cumplir con los siguientes requisitos:

- Trabajar en la banda de frecuencias de 5 GHz. En concreto es las subbandas 5725-5795 MHz y 5815-5855 MHz.
- Disponer de una potencia de transmisión que junto con la ganancia de las antenas seleccionadas pueda ofrecer la suficiente potencia de transmisión y sensibilidad de recepción para conseguir establecer un radioenlace a una distancia de 43.2 Km.
- Sistema de transmisión MIMO [6] (*Multiple Input Multiple Output*), con al menos dos salidas de antena que pueden ser utilizadas individualmente o en conjunto para diferentes antenas instaladas en distintas polaridades.
- Implementar técnicas de selección dinámica de frecuencia (DFS).
- Implementar control de potencia de transmisión (TPC) con un margen de al menos 12 dB.
- Utilizar técnicas de modulación OFDM.
- Ofrecer una tasa de transferencia de datos suficiente para los requisitos del proyecto, aproximadamente 13 Mbps.

Con estas premisas iniciales, se ha buscado entre los fabricantes del sector con reconocido prestigio los equipos que pudieran cumplir con las características necesarias para implementar con fiabilidad el radioenlace diseñado.

Después de barajar varias opciones entre fabricantes como Motorola, Alvarion, Radwin y

Proxim (figura 4), se eligió a esta última como el proveedor que ofrecía unos equipos con la relación precio– prestaciones más adecuadas, ofreciendo la máxima fiabilidad y confianza.



Figura 4. Radioenlace seleccionado: Proxim Tsunami QB8100.

F. Selección de las antenas

En un enlace de gran distancia como el que nos ocupa, es necesario que la señal transmitida se concentre lo máximo posible en el espacio y pueda ser dirigida con la mayor precisión y las menores pérdidas a su destino. Para cumplir con estos requisitos, necesitamos antenas de tipo parabólico de gran directividad y ganancia [3]. Dado que el radioenlace seleccionado implementa técnicas de diversidad espacial (MIMO), se han utilizado iluminadores para las parabólicas con doble polaridad vertical y horizontal, lo que implica dos flujos de transmisión simultáneos en el mismo enlace con una sola parábola.

Se han seleccionado antenas de 60 cm de diámetro con iluminadores de doble polaridad del fabricante Microwaves (figura 5). Las antenas se han protegido con radomos de material plástico, para evitar la acumulación de nieve y hielo y para hacerlas más aerodinámicas y por lo tanto más inmunes al efecto del viento.



Figura 5. Antenas parabólicas seleccionadas: RadioWaves de 60 cm con iluminador de doble polaridad.

Las características de la antena RadioWaves DP2-5.8 seleccionada son las siguientes:

- Frecuencia de uso: 5.725 – 5.850 GHz.
- Polarización: doble, vertical y horizontal.
- Ganancia: 29 dBi.
- Ancho vano (-3 dB): 6.2°.

II. CÁLCULO Y ESTUDIO DEL RADIOENLACE

A. Descripción Física del Radioenlace

El radioenlace objeto de este trabajo, establece un enlace de datos entre la Universidad de Almería y la estación de medidas sismológicas y el observatorio de medidas de ondas electromagnéticas de baja frecuencia ubicados en la Sierra de los Filabres (Almería). La disposición geográfica de los dos emplazamientos a enlazar es en principio benigna para los requerimientos de un radioenlace. Aunque la Universidad de Almería se encuentre junto al mar y por lo tanto su cota de suelo no supera los 5 metros, la estación de mediada de Sierra Filabres se encuentra a una altitud de 1616 metros, con visión directa y sin obstáculos entre ambos emplazamientos (figura 6).

La distancia entre ambas ubicaciones es de 43.2 kilómetros. El terreno sobre el que discurre el enlace va ascendiendo conforme nos acercamos desde la Universidad a la estación de Sierra Filabres. Debido a la altitud de Sierra Filabres, hay visión directa entre ambas ubicaciones y el vano del enlace está limpio de obstáculos. El terreno entre ambos puntos está ocupado por explotaciones agrícolas de secano, algunos invernaderos y terreno baldío y de montaña. El vano del radioenlace forma un ángulo sobre el

norte verdadero de 334° visto desde la Universidad de Almería (tabla 2).

Características físicas del radioenlace	
Distancia	43.2 Km
Orientación	334°
Diferencia cotas	1611 m

Tabla 2. Características físicas del radioenlace.

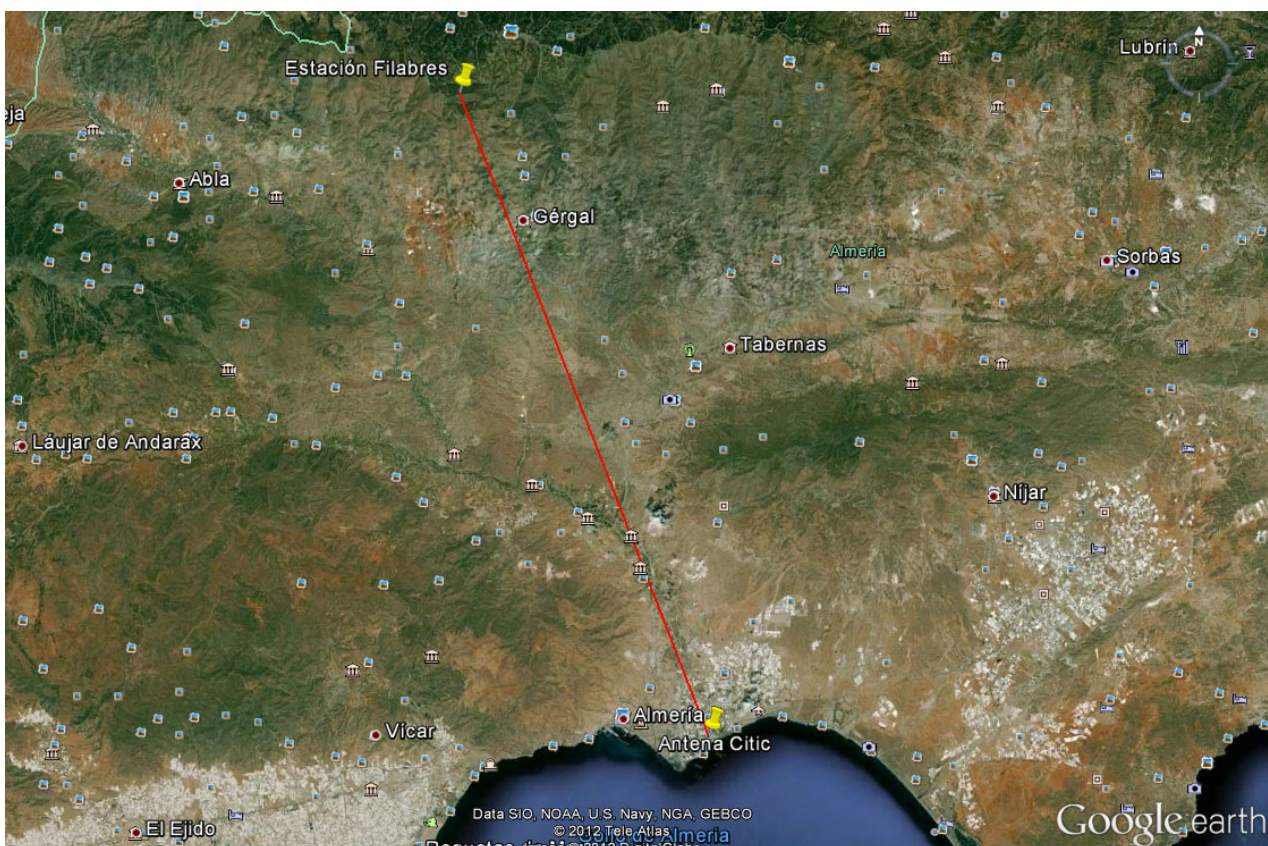


Figura 6. Radioenlace Universidad de Almería – Estación Sierra Filabres.

En la Universidad de Almería, el enlace se ubica en el edificio denominado CITIC (Edificio Científico Técnico de Informática y Comunicaciones) sede de los despachos y

laboratorios de investigación del Grupo Electrónica Comunicaciones y Telemedicina (TIC019), titular del proyecto de investigación en el que se encuadra el presente trabajo (figura 7).

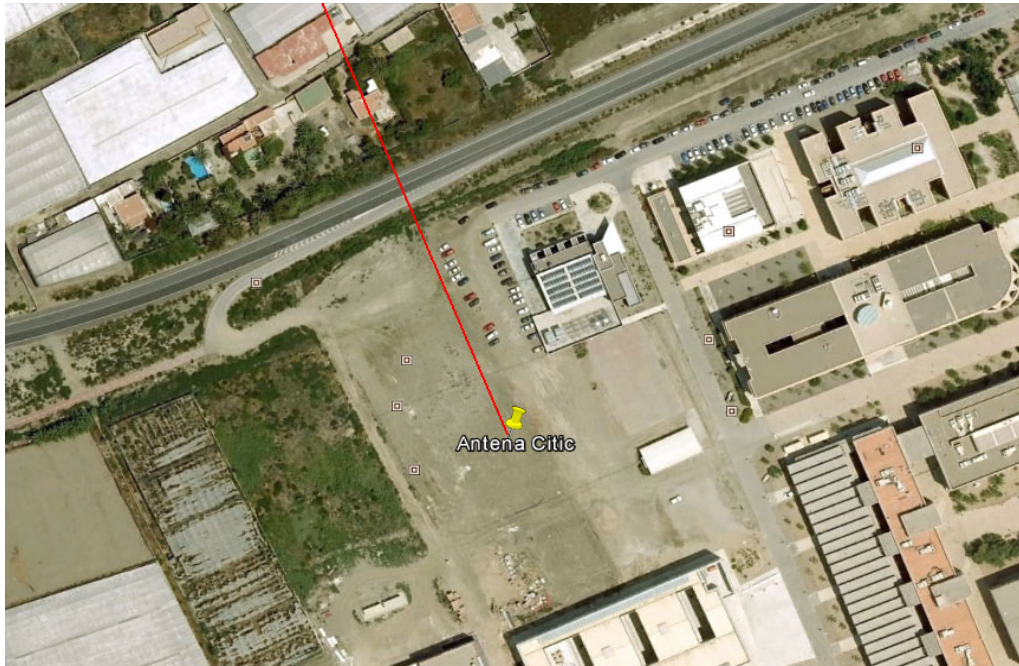


Figura 7. Ubicación del enlace en la Universidad de Almería.

La edificación está situada en el norte del campus de la Universidad de Almería, y consta de planta baja y 2 plantas. La cota de la antena por tanto es de 11 metros sobre el suelo, lo que nos da una altura total de 16 metros. Las coordenadas geográficas del punto exacto en el que se instala la antena son las que figuran en la tabla 3.

Coordenadas Geográficas	
Latitud	36° 49' 47" Norte
longitud	2° 24' 26" Oeste
Cota terreno	5 m
Cota antena	12 m
Cota total	17 m

Tabla 3. Coordenadas geográficas enlace Universidad de Almería.

En la Sierra de los Filabres, el enlace se ubica en la caseta existente para la estación sismológica y el observatorio de medidas de ondas electromagnéticas de baja frecuencia.

Las coordenadas geográficas del punto exacto en el que se instala la antena son las contempladas en la tabla 4.

Coordenadas Geográficas	
Latitud	37° 11' 23" Norte
longitud	2° 34' 55" Oeste
Cota terreno	1616 m
Cota antena	4 m
Cota total	1620 m

Tabla 4. Coordenadas geográficas enlace Sierra Filabres.



Figura 8. Ubicación del enlace en Sierra de los Filabres.

El perfil topográfico entre los dos enclaves en los que se situarán las antenas es propicio para el establecimiento del radioenlace. Tal y como puede apreciarse en el gráfico hay visión directa entre las dos ubicaciones. En el vano no encontramos ningún obstáculo, que si bien no interfiere en la línea directa del mismo, estuviera situado a una distancia crítica. Por lo tanto podemos afirmar que

la primera zona de Fresnel está totalmente libre en más de un 60 % en todo el vano del radioenlace. La primera zona Fresnel es un elipsoide, cuyo radio mayor es de 24 metros para la frecuencia de 5.8 GHz y una distancia del enlace de 43 Km y se encuentra situado en el centro geométrico del rayo que une ambas antenas.

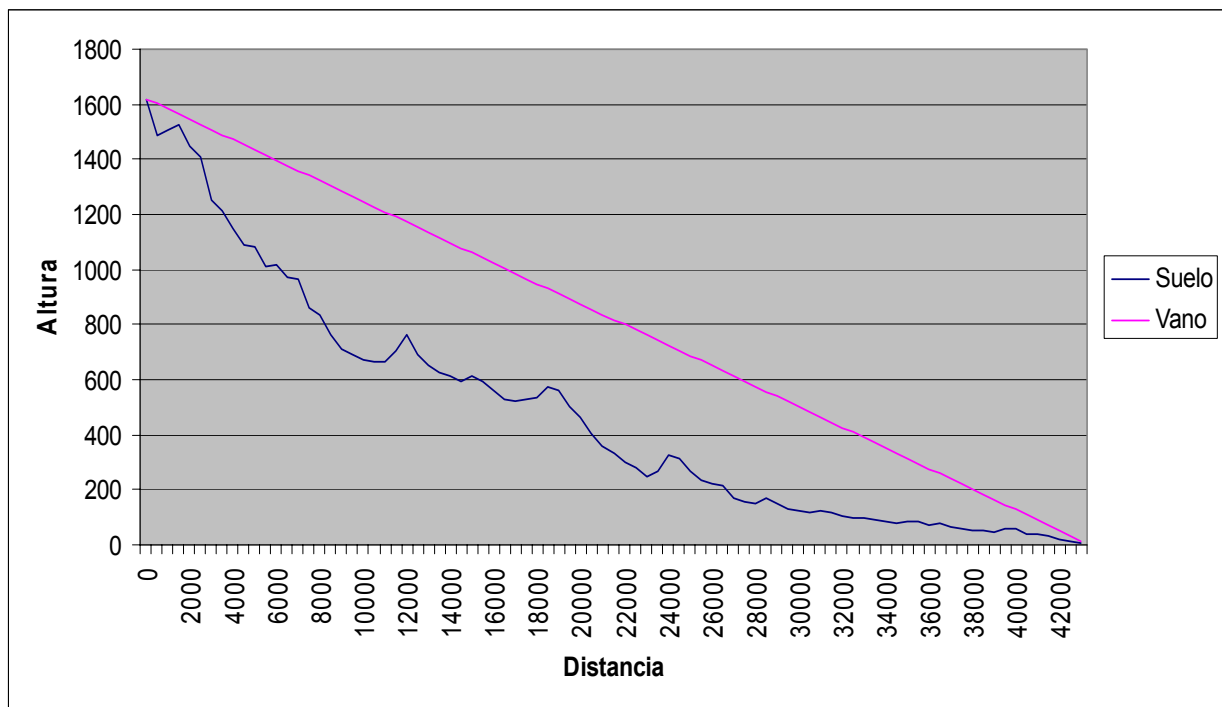


Figura 9. Perfil topográfico del radioenlace.

B. Pérdidas en espacio abierto –Friss

La distancia en ambas antenas es el principal obstáculo a superar por el radioenlace. El recorrido de la señal electromagnética desde la antena receptora a la transmisora a través del medio en el que se realiza genera en la señal unas pérdidas de potencia que están directamente relacionadas con la distancia a superar por el enlace y por la frecuencia de la señal que se utilice [7]. En principio, se estudia las pérdidas de señal considerando la propagación en el espacio libre como referencia, al ser la atenuación mínima a superar. Posteriormente habrá que ir añadiendo las atenuaciones debidas a la presencia de obstáculos, desvanecimientos, lluvia, gases atmosféricos, etc.

La siguiente ecuación calcula las pérdidas de un radioenlace de microondas en el espacio libre, expresado en decibelios:

$$L_{bf} \text{ (dB)} = 92.45 + 20 \log f + 20 \log d$$

Donde:

- f – frecuencia del radioenlace expresado en GHz.
- d – distancia entre antenas expresadas en kilómetros.

Aplicando los datos del radioenlace a calcular:

- Frecuencia: 5.8 GHz.
- Distancia: 43.2 Km.

Resultan unas pérdidas de transmisión en espacio de libre de:

$$L_{bf} = 140.38 \text{ dB} \approx 140 \text{ dB}$$

Es decir, el radioenlace tendrá que tener que superar como mínimo unas pérdidas de 140 dB que son introducidas por espacio recorrido entre ambas antenas.

C. Balance de potencias

Una vez calculado la atenuación en el espacio libre, es necesario calcular el balance de pérdidas y ganancias de potencia, y de niveles de señal en diferentes puntos del sistema [7]. Como son el transmisor, el receptor y el balance total.

Para calcular los citados balances, es necesario conocer varios datos sobre las características de los equipos y antenas a instalar. Los datos que se van a utilizar corresponde al sistema seleccionado, y con ellos se comprobará si es posible realizar el enlace tal y como se había previsto. A continuación se muestran los valores que en un principio se prevén utilizar:

- En el transmisor:
 - Potencia de transmisión: 17 dBm.
Se ha estimado una tasa de transferencia de datos mínima de 13 Mbps que se obtienen utilizando modulación BPSK $\frac{1}{2}$ (*Binary Phase Shift Keying*) con un ancho de banda de canal de 20 MHz. El Transmisor emite con 17 dBm cuando se configura con esta modulación.
 - Ganancia de la antena: 29 dBi.
Correspondiente a la antena parabólica de 60 cm. de diámetro con doble polaridad.
 - Pérdidas del circuito transmisión: 1 dB.
Debidos al cable y conectores entre transmisor y antena.
- En el receptor:
 - Sensibilidad del receptor: -93 dBm.
Sensibilidad que tiene el receptor para una tasa de transferencia de datos de 13 Mbps (BPSK $\frac{1}{2}$) con un ancho de banda de canal de 20 MHz. a una frecuencia de 5.8 GHz.
 - Ganancia de la antena: 29 dBi.
Correspondiente a la antena parabólica de 60 cm de diámetro con doble polaridad.
 - Pérdidas del circuito transmisión: 1 dB.
Debidos al cable y conectores entre transmisor y antena.

Balance del transmisor

El balance del transmisor se calcula teniendo en cuenta las aportaciones de todos los elementos que intervienen en la transmisión de la señal, es decir: el transmisor, el circuito de transmisión y la antena. La potencia radiada por la antena una vez aplicadas las pérdidas y ganancias de los elementos que componen el transmisor es denominada como PIRE (EIRP) potencia isotropa radiada equivalente, valor que caracteriza al transmisor.

La formula que define el balance del transmisor es:

$$\text{PIRE (dBm)} = \text{Pet} - \text{Ltt} + \text{Gt}$$

Donde:

- Pet – Potencia entregada por el transmisor expresado en dBm.
- Ltt – Pérdidas del circuito transmisor expresada en dB.
- Gt – Ganancia de la antena transmisora expresada en dB.

Sustituyendo los valores correspondientes, se obtiene:

$$\text{PIRE} = 17 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} + 29 \text{ dB} = 45 \text{ dBm}$$

Que equivalen a una potencia radiada equivalente de 31.62 vatios.

Balance del enlace

El balance del enlace ofrece la potencia disponible en el receptor en función de la potencia del transmisor, teniendo en cuenta las atenuaciones y ganancias de todos los elementos que intervienen en la comunicación entre el transmisor y el receptor [2, 7].

El nivel de señal disponible en el receptor también denominado RSL – (*Received Signal Level*) cuyo esquema se ha representado en la figura 10, se calcula según la siguiente formula:

$$\text{Pdr (dBm)} = \text{Pet} - \text{Ltt} + \text{Gt} + \text{Lb} + \text{Gr} - \text{Ltr}$$

Donde:

- Pdr – Potencia disponible en el receptor (RSL, *Received Signal Level*) expresado en dBm.
- Pet – Potencia entregada por el transmisor expresado en dBm.
- Ltt – Pérdidas del circuito transmisor expresada en dB.
- Gt – Ganancia de la antena transmisora expresada en dB.
- Lb – Pérdidas en el espacio libre expresada en dB.
- Gr – Ganancia de la antena receptora

expresada en dB.

- Ltr – Pérdidas del circuito receptor expresada en dB.

Sustituyendo los valores correspondientes, se obtiene:

$$\text{Pdr} = \text{RSL} = 17 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} + 29 \text{ dB} - 140 \text{ dB} + 29 \text{ dB} - 1 \text{ dB} = -67 \text{ dBm}$$

Es decir, con una potencia del transmisor de 17 dBm, en el receptor se obtienen -67 dBm de potencia para el radioenlace estudiado. Por tanto la sensibilidad del circuito receptor deberá ser mayor en términos absolutos a la potencia recibida, para que el enlace pueda ser establecido. Como el equipo preseleccionado ofrece una sensibilidad de recepción para los parámetros calculados de -93 dBm, se puede afirmar que el radioenlace en principio es viable.

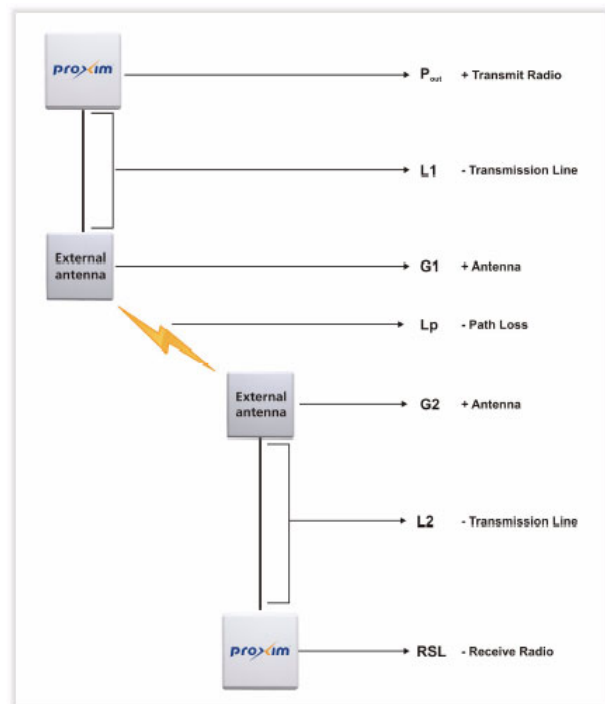


Figura 10. Esquema del balance de potencias del radioenlace.

La diferencia entre el balance de pérdidas y ganancias del enlace, o sea la potencia disponible en el receptor, y la sensibilidad de recepción del receptor, nos da el margen de potencia del radioenlace, denominado, margen de desvanecimiento (*Fade Margin*).

Margen de desvanecimiento = Potencia en el

receptor - Sensibilidad receptor

Sustituyendo por los valores adecuados:

$$\text{Margen desvanecimiento} = -67 \text{ dBm} - (-93) \text{ dB} = 26 \text{ dB}$$

El margen de desvanecimiento nos ofrece una idea de lo fiable que es un radioenlace, cuanto mayor sea el margen de desvanecimiento, mayor será la fiabilidad del enlace.

D. Pérdidas por obstáculos. Fresnel.

Puede suponerse que la forma que adopta una señal electromagnética entre la antena transmisora y receptora, es una línea recta que une ambos puntos. En realidad, el campo resultante es la suma de los campos producidos por anillos concéntricos dispuestos ortogonalmente al eje entre ambas antenas [7]. Cada anillo define una zona Fresnel. Las zonas de Fresnel son elipsoides concéntricos cuyos radios vienen definidos por la siguiente formula:

$$R_n = \frac{548}{2\sqrt{f}} \sqrt{\frac{d_1 d_2}{d}}$$

Donde:

- R_n – Radio de la n-sima zona de Fresnel (m).
- f – Frecuencia (MHz).
- d_1 – Distancia del transmisor al plano (Km).
- d_2 – Distancia del plano al receptor (Km).

Sustituyendo los valores apropiados, calculamos el radio máximo de la primera zona Fresnel que corresponde con el punto medio del enlace, nos da un radio máximo de la primera zona de Fresnel es de 23.64 metros.

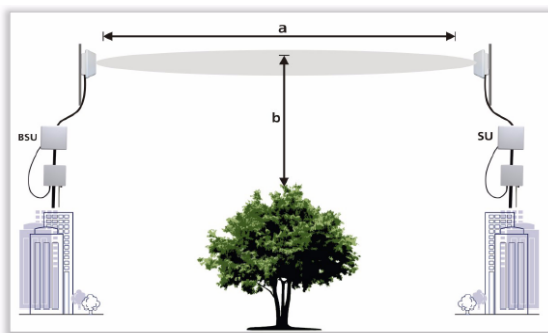


Figura 11. Forma de la señal, 1ª zona de Fresnel.

Cuando una parte significativa de la primera zona de Fresnel esta ocupada por algún obstáculo, una parte de la potencia de la señal se pierde. Por tanto para el correcto funcionamiento de un radioenlace es necesario que este despejado al menos el 60% de la primera zona Fresnel.

En el radioenlace a instalar se puede observar en el perfil topográfico de la figura 9, que la línea de unión de las dos antenas del enlace esta libre de obstáculos en una distancia muy superior a la definida por la primera zona Fresnel, luego no es de esperar atenuaciones de la señal debidas a esta causa.

E. Atenuación por gases y vapores atmosféricos.

Las moléculas agua y oxígeno absorben energía electromagnética a determinadas frecuencias, produciéndose bandas de atenuación elevada en un margen de frecuencias seguidas de zonas de atenuación mucho menor [7]. La atenuación producida por los vapores de agua y oxígeno es aditiva. Para las frecuencias en las que la atenuación es superior a 10 dB por kilómetro el alcance del radioenlace se ve seriamente comprometido, restringiendo la distancia de enlaces de visión directa. Por tanto es imprescindible seleccionar adecuadamente la frecuencia del radioenlace para que las atenuaciones por gases y vapores atmosféricos no impidan su correcto funcionamiento.

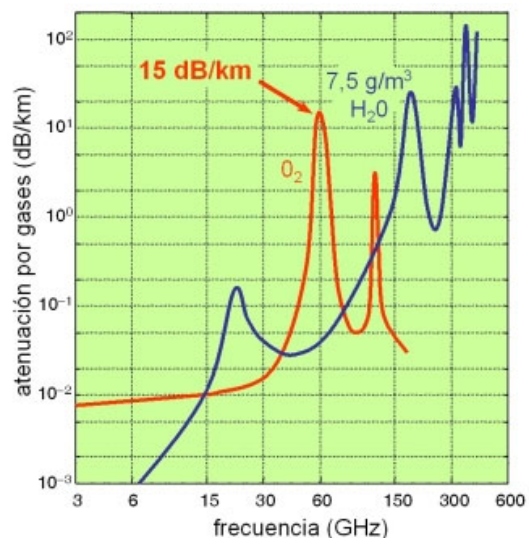


Figura 12. Atenuación debida a gases atmosféricos.

Como se observa en la figura 12 las atenuaciones por vapores de agua y oxígeno son despreciables para frecuencias inferiores a 10 GHz. Por tanto, no tenemos que tomar en consideración esta atenuación en el cálculo del radioenlace, ya que a 5.8 GHz la atenuación producida por los gases y vapores atmosféricos es despreciable.

F. Atenuación por hidrometeoros, lluvia, nieve y granizo.

Las transmisiones de señales electromagnéticas en la troposfera se ve afectada por fenómenos como la absorción y dispersión de la señal al atravesar zonas con presencia de hidrometeoros, como son la lluvia, la nieve y el granizo [7]. La absorción y dispersión de la señal, produce una atenuación en la misma, que para zonas donde la presencia de estos agentes atmosféricos es muy frecuente, es necesario tenerlos en cuenta. Para frecuencias inferiores a 6 GHz estos fenómenos no son significativos, no produciendo una atenuación sobre la señal que pueda impedir el establecimiento del radioenlace.

Por tanto, no es necesario introducir atenuaciones adicionales al balance de pérdidas y ganancias calculado previamente para el radioenlace en estudio, ya que su frecuencia (5.8 GHz.) es inferior a 6 GHz. Aunque los hidrometeoros no afecten a la comunicación entre los equipos, en otros aspectos, es recomendable aislar adecuadamente los conectores y cables del sistema para impedir que la lluvia pueda degradar las conexiones y características de los mismos. También habría que evitar la acumulación de nieve

y hielo en los equipos y antenas debido al área geográfica en la que se va a ser instalado el radioenlace de Sierra Filabres.

G. Resultado del cálculo del radioenlace.

A la vista de los resultados obtenidos se puede afirmar que el radioenlace entre la Universidad de Almería y el observatorio de medidas ubicado en la Sierra de los Filabres, utilizando la banda de frecuencias de 5,8 GHz, mediante el equipo seleccionado es perfectamente viable para una tasa de transferencia de 13 Mbps. No solo viable, sino que el margen de desvanecimiento es de 26 dB. Bastante superior a 10 dB que es considerado el margen de desvanecimiento mínimo para garantizar el establecimiento del enlace.

La tasa de transferencia de 13 Mbps. es el valor mínimo disponible en los equipos para un ancho de banda del canal de 20 MHz., como el margen de desvanecimiento obtenido es alto, no es arriesgado asegurar que el radioenlace podrá funcionar a mayores tasas de transferencia, pudiendo superar los 50 Mbps. Velocidad que supera con creces las necesidades previstas para el radioenlace, pero que ofrecen un margen adicional de prestaciones para posibles usos futuros del mismo.

A continuación se expresa en forma de tabla un resumen de los resultados más relevantes obtenidos en los cálculos efectuados:

Resumen características del radioenlace	
Distancia	43.2 Km
Frecuencia	5.8 GHz
Ancho de banda	20 MHz.
Tasa de transferencia	13 Mbps
Potencia transmisor	17 dBm
Sensibilidad del receptor	-93 dBm
Ganancia de las antenas Tx y Rx	29 dB

Resumen resultados del cálculo del radioenlace	
Pérdidas en espacio abierto	140 dB
PIRE - Potencia isotrópica radiada aparente	45 dBm
RSL - Potencia disponible en el receptor	-67 dBm
Margen del radioenlace	26 dB
Viabilidad del Radioenlace	VIABLE

Tabla 5. Características y resultados del cálculo del radioenlace.

III. RED DE COMUNICACIONES

A. Descripción de la red

El radioenlace instalado tiene como misión fundamental, la de transmitir los datos generados en la estación de registro y medida ubicada en la Sierra de los Filabres, con la Universidad de Almería. Los datos una vez recibidos por el radioenlace, no solo deben ser accesibles desde los departamentos implicados en el estudio de los mismos en la Universidad de Almería, sino que también deben de ser accesibles desde el Instituto Andaluz de Geofísica y desde la Universidad de Granada.

Por otro lado, los datos generados proceden de dos fuentes distintas y totalmente independientes, el sistema sismológico y el captador de ondas electromagnéticas, que deben de mantener su integridad independiente así como el control y permisos de acceso a los mismos.

El acceso a los datos desde el exterior se realiza a través de Internet, mediante una dirección IP pública, con los permisos necesarios generada por los servicios informáticos de la Universidad de Almería. Evidentemente es necesario controlar que el acceso desde el exterior a los datos, solo se produzca por los destinatarios autorizados.

Como se puede observar, el entorno de red que se obtiene es bastante complejo, máxime teniendo en cuenta el acceso desde Internet a dos redes de

datos remotas, y que el radioenlace no permite cualquier tipo de configuración que se necesite. Por tanto es necesario investigar una nueva topología y sus reglas de acceso y control, para conseguir los objetivos requeridos.

Por otra parte, tanto el sistema de captación de datos sismológicos, como el sistema de medición de señales electromagnéticas, tienen sus propios parámetros de red establecidos, formando dos redes físicas independientes, y usando cada uno de ellas unos determinados puertos TCP. Aunque ambas configuraciones podrían ser modificadas, es conveniente que el sistema implementado intente mantenerlos inalterados en la medida de lo posible.

En principio, el sistema admite diferentes soluciones, a saber:

1. Configuración del radioenlace en modo *bridge* (puente), formando una sola red física coincidente con la red pública de la Universidad de Almería (150.214.150.0). En esta configuración, tanto la red sismológica como la electromagnética deben de unificarse en la misma red. Esta implementación es más sencilla de configurar desde el punto de vista de red, aunque tiene el gran inconveniente de tener que modificar los parámetros iniciales de las redes de medida. Además para conseguir un control de acceso adecuado mediante la utilización de redes privadas virtuales, sería necesaria la incorporación de elementos hardware en la estación de Sierra Filabres, con el problema añadido del consumo, limitado por el uso de placas solares y baterías.

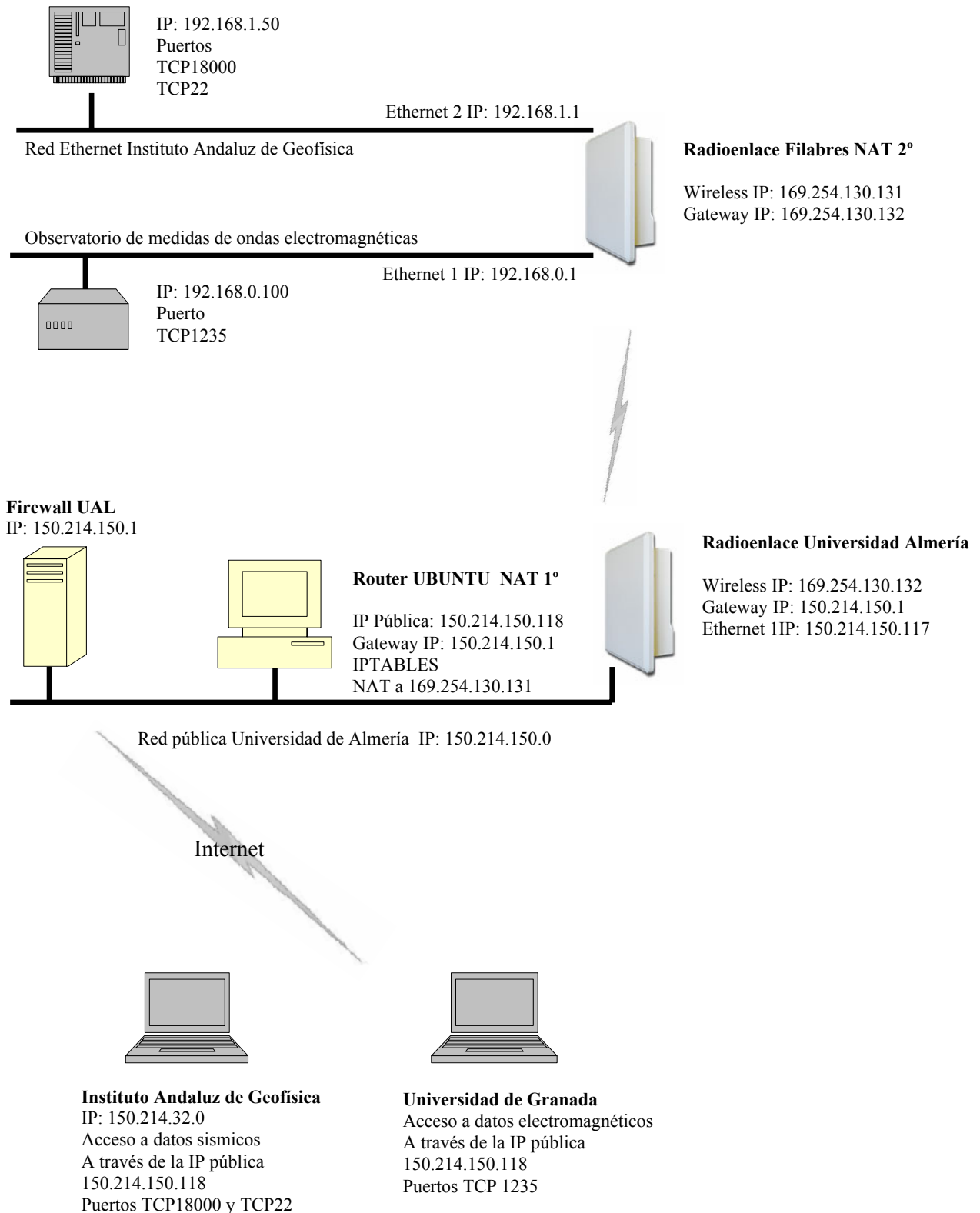


Figura 13. Esquema general de red.

2. Configuración del radioenlace en modo enrutamiento (*routing*). Esta configuración permite utilizar los dos puertos Ethernet de los que esta dotado el equipo del radioenlace como dos redes diferentes, de esta manera, una de las redes se adjudicaría y configuraría para el sistema sismológico y la otra, para el sistema de medida de ondas electromagnéticas, manteniendo los parámetros iniciales de las mismas sin necesidad de modificarlos. En este modo de funcionamiento, el radioenlace permite la implementación de NAT (*Network Address Translation* – Traducción de direcciones de red), con lo que podemos, utilizando una sola IP pública acceder a las distintas redes en función del protocolo y puerto utilizado en el acceso. Esta solución es ideal para el acceso a los datos desde la propia Universidad de Almería ya que la dirección pública del radioenlace es accesible desde toda la red interna. El inconveniente se produce al intentar acceder desde el exterior a través de Internet, ya que esta dirección no es visible desde fuera de la red. Para solventar este problema se ha implementado un *router* con un sistema Ubuntu que mediante *IPtables* realiza una nueva redirección NAT a través de una dirección pública visible desde el exterior. Además en este *router* se han implementado funciones de cortafuegos para impedir los accesos no autorizados.

3. Una tercera solución sería igual a la anterior, solo que las funciones de enrutamiento y redirección NAT realizadas con el sistema Ubuntu, serían realizadas por el cortafuegos o el router de la propia Universidad de Almería. Esta posibilidad ha sido descartada por el momento por el servicio de informática de la Universidad.

De lo expuesto anteriormente, se ha optado por la segunda solución, ya que si bien es más compleja de implementar, permite mantener la independencia de las tres redes a conectar sin modificar prácticamente sus parámetros iniciales. Además, la existencia del cortafuegos propio, permite establecer un control muy preciso de quién y cómo accede a los datos, y a que red tiene acceso. Igualmente desde el punto de vista de la eficiencia energética, esta configuración permite conectar las redes captadoras de datos directamente a los dos puertos Ethernet del

radioenlace, con lo que se evita la incorporación de nuevos elementos (*switch*) con el consiguiente ahorro de consumo eléctrico, ya que en la ubicación de Sierra Filabres no hay disponibilidad de corriente eléctrica convencional, obteniéndose la alimentación de paneles solares y baterías. En los siguientes apartados se desarrolla en detalle la solución adoptada.

B. Configuración del radioenlace

El radioenlace debe ser configurado en modo enrutamiento (*routing*), y activar el servicio NAT. Con esta configuración el acceso al radioenlace se realiza a través de una sola dirección IP pública, que se corresponde con la dirección *wireless* 169.254.130.131. Con la implementación del servicio NAT, conseguimos que se acceda a un dispositivo de una red u otra en función del servicio y puerto que realice la petición.

Por ejemplo, cuando al radioenlace llega una petición a la IP 169.254.130.131, utilizando el protocolo TCP y el puerto 18000, la petición es trasladada automáticamente a la IP del sistema sismológico.

La tabla de redirecciones NAT implementada inicialmente en el radioenlace es la siguiente:

Dirección local	Protocolo	Puerto inicial	Puerto final
192.168.0.50	TCP	18000	18000
192.168.0.50	TCP	22	22
192.168.0.100	TCP	1230	1240

Tabla 6. Tabla NAT del radioenlace.

La configuración descrita, permite el acceso a las dos redes generadoras de los datos, red sismológica y red de medidas de ondas electromagnéticas, desde la red propia de la Universidad, ya que el equipo ubicado en la misma está conectado a dicha red. El acceso desde el exterior no sería posible, ya que la dirección pública del radioenlace, no es visible por no pertenecer a la red pública de la Universidad.

C. Router Ubuntu, IPtables

Para que una dirección IP de la Universidad de Almería pueda ser accesible desde el exterior, esta debe de pertenecer a la red pública de la Universidad (dirección 150.214.150.0) y que el departamento de sistemas la habilite para tal fin. Como estas direcciones, no pueden ser asignadas simultáneamente al equipo del radioenlace ubicado en la Universidad y a la dirección pública de acceso del equipo remoto, es necesario establecer un sistema que permita, accediendo a una de las IP públicas de la red de la Universidad, redireccionar la petición hacia la dirección pública del equipo remoto, que es la que habilita el acceso a las dos redes captadoras de datos.

Para realizar esta misión se ha optado por la implantación en un ordenador dotado con sistema operativo Ubuntu y utilizando *IPtables* [8].

IPtables es un comando del sistema, que utilizando una serie de scripts, permite configurar minuciosamente todos los aspectos de red, como son enrutamiento, NAT, permisos de acceso, cortafuegos, etc. Para conseguir el acceso a la dirección interna del radioenlace, utilizando la dirección pública de este equipo, básicamente lo que se hace es habilitar un primer NAT que traslade las peticiones a los puertos habilitados a la dirección pública del enlace remoto.

Es preciso añadir una ruta estática con el comando *route* [9] para indicarle al *router* que cuando tenga que acceder a la red *wireless* (169.254.130.0) donde está ubicada la dirección IP pública del *router* remoto (169.254.130.131), tiene que realizarlo a través de la dirección IP del radioenlace de la Universidad (150.214.150.117).

```
route add -net 169.254.130.0 netmask  
255.255.255.0 gw 150.214.150.117
```

Por tanto, cuando un usuario autorizado quiere realizar una conexión, por ejemplo, con el sistema captador de datos sísmológicos, deberá hacer una petición a la dirección pública de la red de la Universidad de Almería (150.214.150.118) utilizando el protocolo TCP y el puerto 18000. El *router* Ubuntu se encargará de redirigir la petición a la dirección pública del radioenlace remoto (169.254.130.131) a través de la puerta Ethernet del radioenlace de la Universidad (150.214.150.117). Una vez la petición ha llegado al equipo remoto, este la redirigirá al captador de la red sísmológica (192.168.0.50) utilizando el mismo protocolo TCP y el mismo puerto. Con lo que las peticiones desde el exterior son correctamente atendidas y redirigidas.

La tabla de redirecciones NAT implementada en el *router Ubuntu* es la siguiente:

Dirección origen	Dirección destino	Protocolo	Puerto origen	Puerto destino
150.214.150.118	169.254.130.131	TCP	18000	18000
150.214.150.118	169.254.130.131	TCP	22	22
150.214.150.118	169.254.130.131	TCP	1230:1240	1230:1240

Tabla 7. Tabla NAT del *router Ubuntu*.


```

#!/bin/sh
## SCRIPT de IPTABLES

## 1 FLUSH de reglas
iptables -F
iptables -X
iptables -Z
iptables -t nat -F

## 2 Establecemos politica por defecto
iptables -P INPUT ACCEPT
iptables -P OUTPUT ACCEPT
iptables -P FORWARD ACCEPT

# 3 Activamos el enrutamiento
# activamos el BIT DE FORWARDING
echo 1 > /proc/sys/net/ipv4/ip_forward

# 4 Añadimos ruta para acceder a la red wireless
route add -net 169.254.130.0 netmask 255.255.255.0 gw 150.214.150.117

# 5 Habilitamos el servicio SNAT
iptables -t nat -A POSTROUTING -o eth1 -j MASQUERADE

# 6 monitorizar reglas de NAT
iptables -t nat -L

# 7 DNAT - entrada
iptables -t nat -A PREROUTING -d 150.214.150.118 -p tcp \
--dport 18000 -j DNAT --to-destination 169.254.130.131:18000

iptables -t nat -A PREROUTING -d 150.214.150.118 -p tcp \
--dport 22 -j DNAT --to-destination 169.254.130.131:22

iptables -t nat -A PREROUTING -d 150.214.150.118 -p tcp \
--dport 1230:1240 -j DNAT --to-destination 169.254.130.131

echo " Configuración realizada."
# Fin del script

```

Figura 14. Script IPTables implementado.

IV. INSTALACIÓN Y PRUEBAS DEL RADIOENLACE

A. Descripción del radioenlace

La descripción física del radioenlace objeto de este trabajo, se describe con detalle en el apartado II-A.

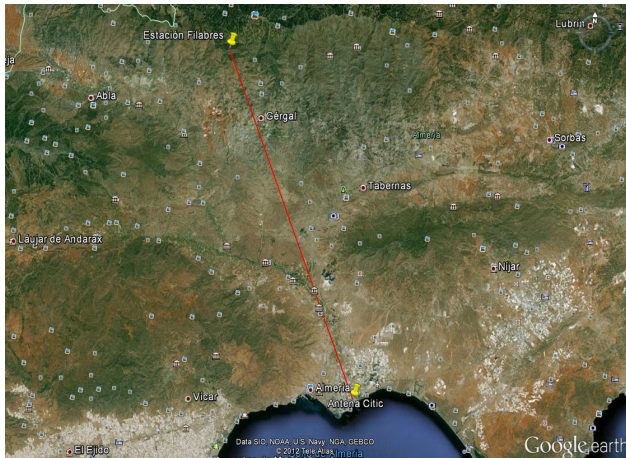


Figura 15. Radioenlace Universidad de Almería – Estación Sierra Filabres

La tabla siguiente resume los datos que caracterizan al radioenlace entre la Universidad de Almería y Sierra Filabres.

Características físicas del radioenlace	
Distancia	43.2 Km
Orientación	334°
Diferencia cotas	1611 m

Tabla 8. Características físicas del radioenlace.

B. Emplazamiento de las Antenas

En el proceso de instalación del radioenlace, uno de los pasos más importantes para el adecuado funcionamiento del mismo, es la correcta elección del emplazamiento de las antenas en ambas partes del enlace. Para poder conseguir las máximas prestaciones, las antenas de los equipos deben de estar en una línea con visión directa. Aunque en entornos urbanos, el Tsunami QB100 puede funcionar sin tener visión directa, ya que las

edificaciones generan múltiples reflexiones que alcanzan al equipo, los mejores resultados se obtienen cuando existe visión directa entre los equipos.

La condición de visión directa adecuada, engloba tanto a la condición de que no existan obstáculos entre las dos antenas, como que no haya obstáculos en más del 60% de la primera zona de Fresnel. Cuando una parte significativa de la primera zona de Fresnel es obstruida, una parte de la energía se pierde con la consiguiente reducción de prestaciones. Igualmente sucede si hay obstáculos cerca del vano del enlace, produciéndose reflexiones y ruido que interfieren con la señal transmitida. Obstáculos típicos que deben ser evitados son los edificios cercanos, árboles, líneas de transporte eléctrico, etc.

Para minimizar las influencias producidas por obstáculos, interferencias, reflexiones y ruidos se deberán seguir los siguientes consejos [10]:

- Las antenas deben ser instaladas lo más alto posible.
- Deberán evitarse los árboles y en general vegetación que pueda introducir absorciones debido a cambios estacionales.
- La separación entre otras antenas o dispositivos será al menos de 2 metros.
- Deberán evitarse entornos con grandes superficies reflectantes, como edificios de espejos y cristal, superficie del agua, humedades, líneas eléctricas y telefónicas, etc.



Figura 16. Izquierda: Antena parabólica sin protección
Derecha: Antena parabólica con el radomo protector instalado.

Las influencias meteorológicas como la lluvia o nieve, no tienen efectos considerables sobre las prestaciones del radioenlace, debido a que a la

frecuencia de 5.8 GHz estas pueden ser despreciadas como se ha comentado con anterioridad. Únicamente podría verse afectada si la antena se cubre de hielo o nieve, situación poco probable en la antena ubicada en la Universidad de Almería, aunque en la antena ubicada en la Sierra de los Filabres a una altitud de 1600 metros si que se puede producir este fenómeno durante el invierno. Para evitar la formación y acumulación de hielo y nieve se les ha dotado a las parabólicas con la protección de un radomo o carcasa de forma cónica que cubre tanto al reflector como al iluminador. El radomo también mejora la resistencia al viento de la antena al hacerla más aerodinámica.

En Universidad de Almería, la antena se ha situado en la cubierta del edificio denominado CITIC. La posición exacta de la antena en la cubierta ha sido determinada por diferentes circunstancias: la existencia de una salida de cables cercana, la posibilidad de colocar las garras de anclaje en una pared con suficiente solidez, la distancia a otras antenas instaladas en la cubierta, la visión directa y sin obstáculos de la Sierra de los Filabres. En la foto siguiente se aprecia la posición e instalación real de la antena en la Universidad de Almería.



Figura 17. Ubicación equipo y antena en la cubierta de la Universidad de Almería

En la Sierra de los Filabres, la antena se ha situado en la caseta propiedad del Instituto Andaluz de Geofísica donde se ubican los elementos de medida y toma de datos suministradores de la información a transmitir por el radioenlace. Para la colocación de la antena

parabólica se instaló en la cubierta de dicha caseta un mástil con riostras fijas de altura suficiente para que la antena quede por encima de los paneles solares ubicados en la misma. En la foto siguiente se aprecia la posición e instalación real de la antena en la caseta de Sierra Filabres.



Figura 18. Ubicación equipo y antena en Sierra de los Filabres.

C. Toma de tierra y protección de sobretensiones atmosféricas

El mástil de ambas antenas se conecta a tierra con un cable 25 mm² de sección.

Tanto el equipo, como el aislador de sobretensiones, se han conectado a la tierra general utilizando cable de 10 mm² de sección. Para el correcto funcionamiento de la toma de tierra se deben de seguir los siguientes consejos [11]:

- Cortar la longitud de cable sobrante entre el conector de tierra de equipo o el aislador al punto de toma de tierra.
- Evitar curvas bruscas en el cable, no enrollar el cable sobrante.

- La impedancia de tierra correcta es de 1 ohmio.
- Medir la impedancia de tierra en el punto donde el tierra del equipo es conectado.
- Conectar la tierra del equipo y la del aislador a un único punto común de tierra.
- Asegurar que las tomas de tierra están correctamente sujetas y apretadas.
- No realizar la instalación de antenas durante una tormenta.

Para la protección contra sobretensiones de origen atmosférico, el Tsunami QB8100 viene dotado con dos protectores contra descargas [11], ver figura 19. Estos protectores se intercalan en el cable Ethernet que alimenta al equipo, tanto de corriente eléctrica como de datos. Los protectores son transparentes a la comunicación de datos en categoría 5e y 6, y a la alimentación PoE (*Power over Ethernet*). Para el correcto funcionamiento del aislador, este debe ser conectado a tierra con un cable de sección no inferior a 10mm². Es necesaria la instalación de dos aisladores de descargas, uno en la antena, cerca del equipo, y el otro, lo más cerca posible del punto en el que el cable Ethernet se introduce en la edificación.



Figura 19. Protector contra sobretensiones atmosféricas.

D. Polarización y alineación de las antenas

El radioenlace utilizado, Tsunami QB8100, viene dotado con un sistema de transmisión

MIMO [6], con tres salidas de antena que pueden ser utilizadas individualmente o en conjunto para diferentes antenas instaladas en distintas polaridades.

En nuestro caso, se han utilizado antenas parabólicas con iluminadores de doble polaridad, es decir, polarización horizontal y vertical simultáneamente, haciendo uso de dos de las tres salidas del radioenlace, ver figura 20.

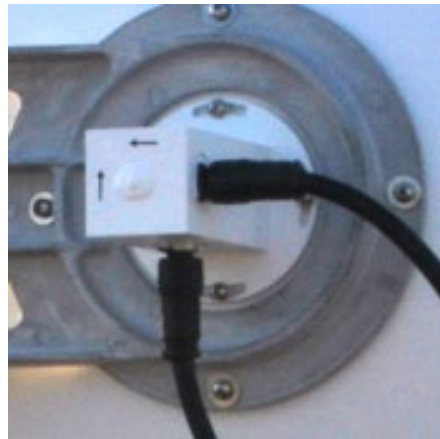


Figura 20. Iluminador parabólico con doble polaridad, vertical y horizontal.

MIMO es una tecnología de antena inteligente que ofrece gran rendimiento en dispositivos inalámbricos con un coste relativamente bajo. La tecnología MIMO se caracteriza por el uso de múltiples transmisores y receptores. En una comunicación inalámbrica real, la señal se refleja en los objetos y obstáculos que se encuentra, alcanzado al receptor siguiendo diferentes caminos, en los que recorre distancias diferentes y sufren distintas interferencias y atenuaciones, este fenómeno denominado comunicación multitrayecto o multicamino, es causante de interferencias y desvanecimientos en la señal recibida. Si en el receptor tenemos varios sistemas de recepción independientes, al combinar las distintas señales recibidas para cada frecuencia, conseguimos que la potencia recibida sea mayor y eliminar gran parte los problemas relacionados con las señales multitrayecto. Lo mismo sucede en la transmisión de la señal, con la utilización de varios transmisores simultáneos.

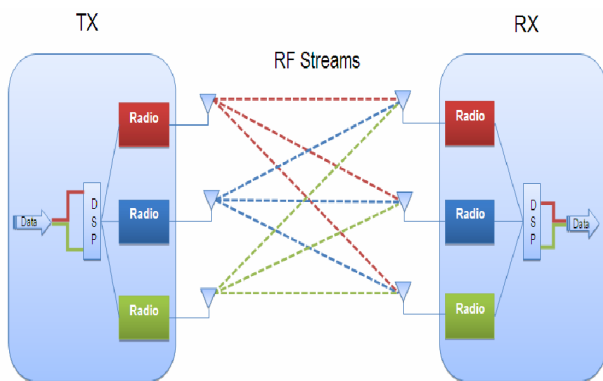


Figura 21. Esquema sistema MIMO 3x3.

El sistema MIMO de multiplexación espacial más simple es 2x2, formado por dos sistemas de transmisión, dos de recepción y dos canales de transmisión de datos. Los sistemas MIMO 2 x 2 ofrecen mayor ganancia de antena (del orden de 3 a 6 dB) que los MIMO 3 x 3 de similares características (figura 21), siendo apropiados para enlaces tanto LoS (*Line of Side* – visión directa) como NLoS (*Non Line of Site* – No visión directa). Los sistemas MIMO 3x3 genera la redundancia de la señal mediante la propagación de los dos canales de datos sobre los tres flujos de transmisión, lo que mejora la tasa de transmisión en entornos con condiciones problemáticas, haciéndolo ideal para enlaces sin visión directa (NLoS).

Teóricamente, un aumento del número de transmisores y receptores, supone un aumento de las prestaciones de los sistemas MIMO, pero esta comprobado que el incremento de prestaciones no esta justificado con la complejidad y coste de los equipos necesarios.

La alineación de los dos equipos que forman el radioenlace es un procedimiento fundamental durante la instalación del sistema. Consiste en la orientación correcta de las antenas del equipo transmisor y receptor para que el enlace entre ellas sea el mejor posible. De ello dependen el establecimiento del enlace, así como las prestaciones máximas que podemos obtener del mismo.

El Tsunami QB8100 ofrece varias herramientas para realizar una correcta alineación de las antenas [10] de ambos equipos:

- Alineación audible. Sistema que se activa desde el interfaz de comandos CLI y que

genera un pitido que va variando de frecuencia en función de la relación señal/ruido del enlace. Cuando aumenta la relación señal/ruido, lo que implica mejor alineación de las antenas, la frecuencia de los pitidos aumenta, al contrario sucede al disminuir la relación señal/ruido, es decir los pitidos se distancian en el tiempo.

- También es posible visualizar la relación señal/ruido a través del interfaz de comandos CLI. Podemos monitorizar tanto la relación señal/ruido de la parte local (equipo la que estamos conectados) como remota.
- Usando la herramienta *Link Test*. *Link Test* está disponible desde el interfaz web, y muestra de forma gráfica y numérica los niveles de señal y de ruido con los que son recibidos los paquetes en el equipo local y en el remoto. La relación señal/ruido local y remota también es mostrada por la herramienta.

La alineación de las antenas del radioenlace entre la Universidad de Almería y Sierra Filabres, ha resultado un proceso complicado, debido a que desde ambos emplazamientos, aunque hay una visión directa, debido a la gran distancia que los separa, no es posible identificar visualmente desde un emplazamiento el contrario. Por tanto se han tenido que utilizar métodos que permitieran ajustar las antenas sin apuntamiento directo. En primer lugar se han obtenido teóricamente el azimut y la inclinación de ambas antenas. En segundo lugar se han obtenido referencias a elementos que si pueden ser visibles desde los emplazamientos de las antenas, en concreto, se ha obtenido el azimut de la antena de Sierra Filabres respecto a la cúpula principal del observatorio del Calar Alto.

Azimut y elevación de la antenas	
Azimut Universidad	334°
Elevación Universidad	2°
Azimut Sierra Filabres	154°
Elevación Universidad	-2°
Azimut Filabres – Calar Alto	5°

Tabla 9. Características y resultados del cálculo del radioenlace.

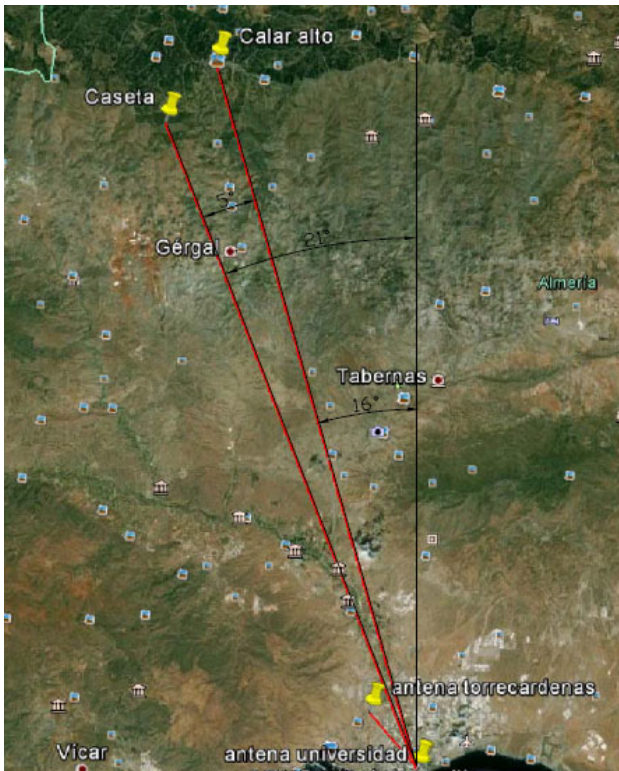


Figura 22. Azimut enlace Universidad-Sierra Filabres y Calar Alto

El proceso de alineación se ha realizado en tres fases. En primer lugar se oriento la antena del equipo situado en la Universidad, la orientación se realizo a vista utilizando una mirilla telescópica apuntando hacia la cúpula principal del observatorio del Calar Alto, y desplazando 5° hacia la izquierda la antena sobre la referencia anterior. Una vez ajustada, se comprobó con

brújula que coincidiera el rumbo obtenido con el calculado teóricamente.



Figura 23. Comprobando la alineación de la antena de Sierra Filabres.

En segundo lugar se instaló el equipo de Sierra Filabres. La antena se oriento en principio utilizando la brújula, moviendo manualmente la antena en pequeños incrementos hasta que se consiguió establecer el enlace entre ambos equipos. Una vez realizada la conexión, se hizo un ajuste fino de la alineación utilizando la herramienta *Link Test* desde un portátil conectado directamente al radioenlace.

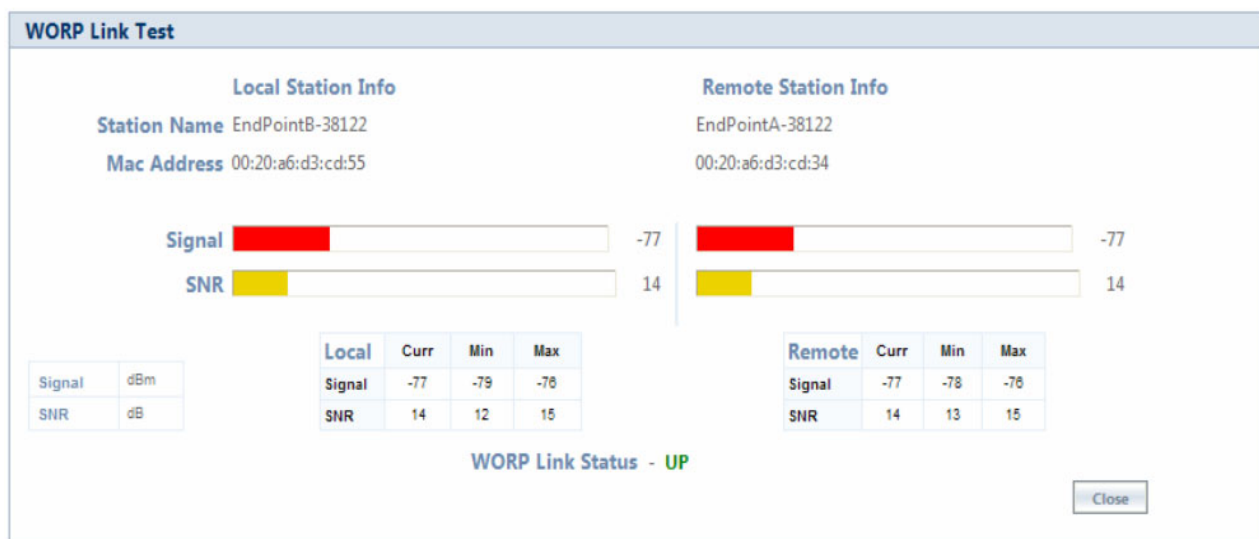


Figura 24. Pantalla del test de enlace, después de alinear la antena de Sierra Filabres, 2º fase.

En tercer y último lugar, una vez obtenida la mejor señal posible en el emplazamiento de Sierra Filabres, se procedió a reorientar la antena ubicada en la Universidad de Almería. El ajuste fino de las antenas parabólicas se realiza mediante dos tornillos de ajuste instalados en la base de sujeción de la parábola, uno para el ajuste de la elevación y otro para el ajuste del azimut. Una vez realizado el ajuste fino de la antena de la Universidad de Almería, se obtuvieron los niveles mostrados en la figura 25, donde se aprecia un incremento de 17 dB en la señal y más de 20 dB en

la relación señal/ruido. Demostrando hasta que punto es importante el correcto ajuste y alineamiento de las antenas que conforman un radioenlace, máxime cuando se utilizan antenas de gran directividad y la distancia entre ambas ubicaciones es considerable, 43 Km. Un alineamiento incorrecto puede producir una falta de fiabilidad del enlace, ocasionando la caída temporal o incluso permanente del mismo con cualquier pequeña variación de la propagación, interferencias, degradación, etc.

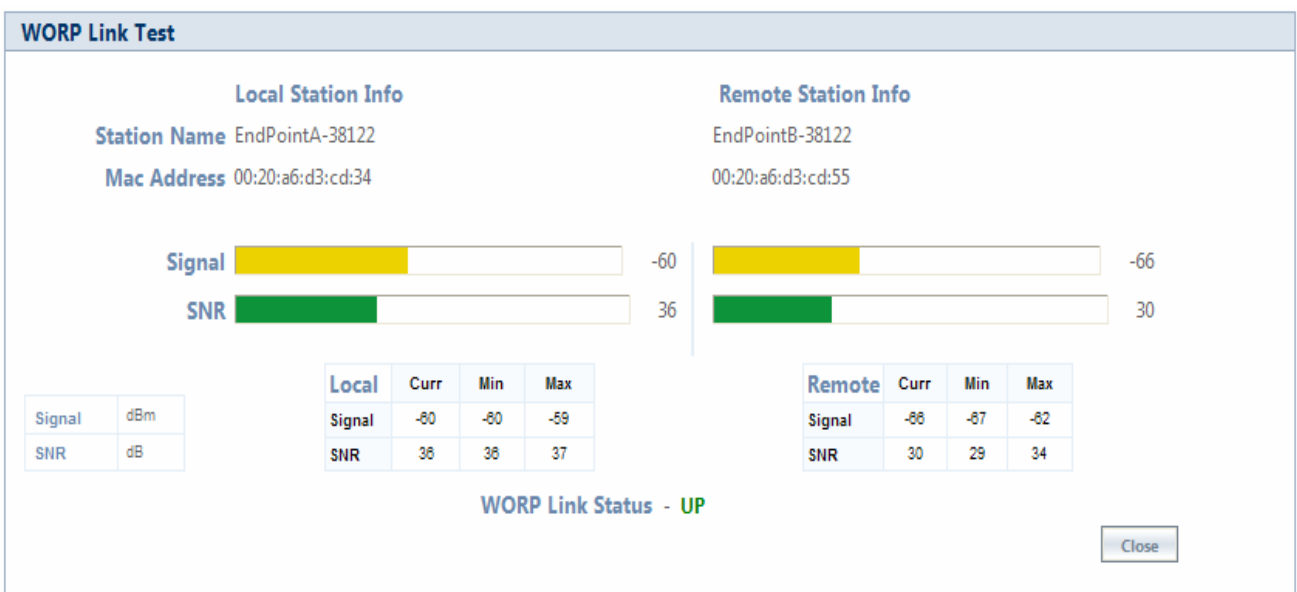


Figura 25. Pantalla del test de enlace, después de realinear la antena de la Universidad de Almería, ajuste final.

E. Aislamiento al agua

Muchos de los problemas asociados a las instalaciones inalámbricas en el exterior, como la degradación de las prestaciones, son debidas a la corrosión de los cables de la antena y los conectores. Para evitar en lo posible esta degradación es conveniente el correcto sellado de los conectores de exterior con la adecuada cinta impermeable, al igual que el uso de cables indicados para exterior. Es aconsejable realizar este sellado una vez que el radioenlace está correctamente instalado, alineado y probado.



Figura 26. Protectores de conexión impermeables

Aunque la entrada de cables al radioenlace esta protegida con sus correspondientes conectores aislantes impermeables, todos las entradas de cable han sido protegidas con cinta vulcanizable que permite un correcto sellado y protección de los mismos, ver figura 27.



Figura 27. Impermeabilizando con cinta vulcanizable.

F. Pruebas de funcionamiento

Completada la instalación del radioenlace, se ha procedido a comprobar su funcionamiento y rendimiento. Debido a la distancia existente en el enlace, la velocidad máxima que se obtiene, manteniendo una aceptable relación señal/ruido a

52 Mbps. Se ha optado por mantener la velocidad del enlace en las condiciones menos exigentes respecto a señal, y que se corresponden con la velocidad de 26 Mbps.

Para estas velocidades se obtiene una señal media en el receptor de -60dB, con una relación señal/ruido de 36 dB. Como se puede observar con dicha relación señal/ruido el enlace no debe de forzarse a velocidades superiores, más aún, cuando estas no son necesarias, ya que la cantidad de información que tanto el sistema sísmológico, como el captador de ondas electromagnéticas de baja frecuencia, generan, requieren un volumen de transmisión sensiblemente inferior a los 26 Mbps conseguidos en el enlace.

En las siguientes capturas de pantalla se pueden observar:

La estadística del enlace, en la figura 28, muestra las tasas de transferencias de datos implementadas, así como los valores de señal y la relación señal/ruido para cada uno de los dos receptores de cada enlace (polarización vertical A1 y horizontal A3).

Pantalla resumen del estado del enlace, con los principales parámetros del enlace y sus valore, así como el reistro de eventos (figura 29).

End Point B Link Statistics													
S.No	End Point B Name	MAC Address	Local Tx Rate (Mbps)	Remote Tx Rate (Mbps)	Local Antenna Port Info	Local Signal (dBm)	Local SNR (dB)	Local MIMO Chain Bal.	Remote Antenna Port Info	Remote Signal (dBm)	Remote SNR (dB)	Remote MIMO Chain Bal.	Details
1	EndPointB-38122	00:20:a6:d3:cd:55	52	52	A1 ●	-74	22	Balanced	A1 ●	-73	23	Balanced	
					A2 ○	-	-		A2 ○	-	-		
					A3 ●	-73	23		A3 ●	-67	29		

Legends

- Antenna Port Disabled
- Antenna Port Enabled and Signal Present
- Antenna Port Enabled but No Signal

Notes: Chain Balance Status is not relevant if "Data Streams/DDR5 Stream Mode" is set to Single

Figura 28. Estadísticas de conexión, conectado a 52 Mbps.

System Summary

System Name	EndPointA-38122
System Up-Time	00:07:04:49 (dd:hh:mm:ss)
IP Address	150.214.150.117
Remote Partners	1
Radio Mode	End Point A
Network Mode	Routing

Interface	Status	Physical Address	Speed/Mode
Ethernet 1	UP	00:20:a6:d3:c6:04	100 Mbps / Full Duplex
Ethernet 2	DOWN	00:20:a6:d3:c6:05	
Wireless	UP	00:20:a6:d3:cd:34	DDRS Enabled

Event Log

```

00d:00h:01m:07s-->Wireless:Tx Rate 52Mbps,Channel 149,Ch.BW 20MHz, Tx.Chain Mas
00d:00h:01m:07s-->Wireless:TPC:0.0,Cur Power(combined:20.0dBm single chain:17.0
00d:00h:01m:07s-->System Initialization Successful.
00d:00h:03m:08s-->Soft Reset Parameter Modified
00d:00h:03m:08s-->Channel 149 is set as the current channel.

```

Clear Event Log Refresh

Figura 29. Pantalla principal de información del radioenlace.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha supuesto un importante punto de referencia en el campo de las comunicaciones inalámbricas a larga distancia y alta velocidad para aplicaciones en tiempo real. Algunas redes de datos de estaciones científicas como las de tipo sísmológico o las mediciones electromagnéticas requieren un flujo de datos de alta velocidad en tiempo real y con este trabajo se ha demostrado la capacidad de los modernos enlaces de microondas para comunicar con potencias del orden de 20 dBm a 5.8 GHz manteniendo una velocidad de comunicación del orden de 50 Mbps.

Por otro lado, la gestión del tráfico de información para redes de distinta naturaleza se ha mostrado efectiva mediante las reglas de *Networking* implementadas en este trabajo,

permitiendo a los distintos usuarios situados en distintas localizaciones (Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada y Universidad de Almería) poder acceder a través de sus canales a sus datos en tiempo real de forma transparente para ellos.

VI. FUTUROS TRABAJOS

En trabajos futuros se considera de interés el desarrollo de herramientas embebidas para el control de tráfico en este tipo de redes: Radioenlace-Internet. También la investigación en el tipo de sistemas MIMO para conseguir mejores prestaciones a igualdad de potencia legal permitida.

VII. REFERENCIAS

- [1] Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-R V.431-7: Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de ondas empleadas en telecomunicaciones.
- [2] Francisco Ramos Pascual. Radiocomunicaciones. Editorial Marcombo, Ediciones Técnicas 2007. ISBN: 978-84-267-1449-7.
- [3] José Luis Fernández Carnero y Ramón M^a Lois Santos. Editorial Televes, S.A. Sistemas para la recepción de TV analógica y digital.
- [4] L. Inkyu, C. Sundberg. Wireless OFDM systems with multiple transmit and receive antennas with bit-interleaved coded modulation. IEEE Wireless Communications, IEEE Vol: 13, pp: 80 – 87. 2006.
- [5] N. Dusit, Niyat, H. Ekram. Radio Resource Management in MIMO-OFDM-Based Wireless Infrastructure Mesh Networks: Issues and Approaches. IEEE Communications Magazine. Vol 1, pp: 100-107. Nov. 2007.
- [6] I. Wei, G. Ascheid, et all. Efficient Channel-Adaptative MIMO Detection Using Just-Acceptable Error Rate. IEEE Transaction on Wireless Communications. Vol 10 (1) pp: 73-83. 2011.
- [7] José María Hernando Rábanos. Transmisión por radio. Editorial Centro de estudios Ramón Areces, S.A. ISBN: 84-8004-065-3.
- [8] D. Rovniagin, A. Wool. The Geometric Efficient Matching Algorithm for Fierewalls. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. Vol 8 (1) pp: 147-159. 2011.
- [9] Richard Petersen. Ubuntu: the complete referente. Editorial McGraw-Hill
- [10] Tsunami QB8100/MP8100 series. Antenna Installation Guide. Editorial Proxim wireless corporation.
- [11] Tsunami QB8100 series. Installation and management Guide. Editorial Proxim wireless corporation.

Resumen - En la actividad científica y de investigación es necesario en muchos casos ubicar estaciones de medida y toma de datos en diferentes lugares, habitualmente alejados de los centros de investigación, donde se realiza el estudio y análisis de dichas medidas y datos. Si las instalaciones científicas de toma de datos se encuentran en entornos alejados de las zonas habitadas, como pueden ser entornos naturales, de montaña o zonas rurales, no es posible el uso de las redes públicas de telecomunicaciones para acceso a los datos desde los centros de investigación. Una solución a este problema es la instalación de radioenlaces entre las estaciones científicas de media y los centros de investigación. Este trabajo fin master estudia, calcula e implementa un radioenlace de larga distancia entre la estación de medidas sismológicas y el observatorio de medidas de ondas electromagnéticas de baja frecuencia ubicados en la Sierra de los Filabres (Almería) y la Universidad de Almería, así como los sistemas y reglas de enrutamiento para el tráfico transparente de diferentes redes de datos .

Abstract: — In scientific activity and investigation is necessary in many cas,e establish measurement station and data acquirement at different place, usually far away of the investigation centers, where the study and analysis of de data are made. If the scientific station of data acquirement are place far away from the habited zone, as natural place, mountain and rural zone, is not possible to use the public communication network for the access of data from the investigation centers. A solution of this problem is the installation of radio link between the scientific measurement station and the investigation center, This master final work, study, calculate and implemented a long distance radio link between the seismologic measurement station and the low frequency electromagnetic wave measurement, placed in Sierra of Filabres (Almeria) and the University of Almería, as well as the system and rules of traffic routing between the different data networks.

