





# Resumen.

En la actualidad los directos de la televisión que se realizan fuera de Zaragoza capital se realizan a través de satélite, lo cual implica un alquiler muy costoso. Este proyecto nace de la necesidad de obtener una alternativa de transmisión terrestre para unidades móviles de televisión.

Esta solución es posible gracias a las nuevas tecnologías inalámbricas que han ido evolucionando en los últimos años y estudiaremos en los próximos capítulos y a la red REPITA que cubre todo Aragón desarrollada por Aragón Telecom y que se explica en el apartado 1.1.2.

El proceso llevado a cabo en este proyecto fue en un primer lugar el estudio previo de las tecnologías, optando finalmente por WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) como la mejor solución. En una segunda fase se definieron y diseñaron las pruebas a realizar con el objetivo de cumplir las expectativas planteadas. Y para terminar se realizó un análisis y evaluación de un sistema de codificación y transmisión en los diferentes escenarios que pueden darse en una situación real: LOS (línea de vista y zona de Fresnel libre de obstáculos), OLOS (con línea de vista, pero obstáculos en la zona de Fresnel), NLOS (sin línea directa y buscando reflexiones) y en movimiento.

Finalmente se llegó a la conclusión de que la mejor tecnología a utilizar depende del escenario y por tanto, ha de optarse por una solución mixta.



# Agradecimientos.

Durante todo el tiempo en el que he estado realizando este proyecto siempre he tenido personas a mi alrededor que me han apoyado y animado para seguir adelante. Ahora me gustaría agradecerles sus consejos y esfuerzo porque sin su ayuda todo habría resultado mucho más difícil.

A Emiliano, por haberme ofrecido y dado la oportunidad de poner en práctica este proyecto y a todo Aragón Telecom, porque después de este tiempo en su excelente ambiente cada uno me ha ayudado y enseñado algo.

Al ITA, por abrirme sus puertas y ofrecerme sus recursos estos últimos meses, y en especial a Mapi, por su colaboración en las pruebas.

A mis directores Héctor y Rafa, por ayudarme a solucionar los problemas que iban surgiendo cuando más complicados parecían.

A Toni, mi ponente, por redirigirme cuando veía que iba a perderme y lograr que saliera siempre con fuerzas renovadas de su despacho.

A mi madre, por preocuparse desde el primer día y aconsejarme cuando más falta me hacía.

A mi padre, porque he llegado aquí gracias a su impulso y siempre ha seguido ahí.

A mis abuelas, porque ¿quién no necesita una abuela? y dos mejor que una.

A mi novia, que ha sido el muro de carga de este proyecto y a pesar de los momentos difíciles nunca ha dejado de animarme y confiar en mí.

A mi compañero de piso y amigos, por amenizarme los ratos más tediosos.

Y en general a todos, por la parte que les haya tocado soportar.

---







# Índice

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1.  Marco del proyecto .....	1
1.1.1.  Introducción .....	1
1.1.1.  Situación actual de Aragón TV .....	1
1.1.2.  Aragón Telecom .....	2
1.1.3.  ITA (Instituto Tecnológico de Aragón).....	2
1.2.  Objetivos del PFC .....	3
1.3.  Planificación.....	3
<b>CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN TECNOLÓGICA .....</b>	<b>7</b>
2.1.  Introducción.....	7
2.1.1.  Factores técnicos .....	7
2.1.2.  Factores económicos .....	8
2.2.  Análisis de tecnologías .....	9
2.2.1.  Telefonía móvil 3G.....	9
2.2.2.  WiFi .....	10
2.2.3.  WiMAX .....	10
2.2.4.  COFDM .....	12
2.3.  Comparativa entre las tecnologías .....	13
2.4.  Conclusión.....	16
<b>CAPÍTULO 3. Metodología del desarrollo.....</b>	<b>17</b>
3.1.  Introducción .....	17
3.2.  Diseño de la configuración .....	17
3.2.1.  Equipo preWiMAX fijo en banda libre de Alvarion .....	18
3.2.2.  Equipo WiMAX móvil estándar en banda licenciada de Motorola.....	20
3.3.  Elección de los equipos.....	22
3.3.1.  Montaje previo al piloto real.....	22
3.3.2.  Montaje del piloto real.....	23
3.4.  Elección de los escenarios .....	23
3.4.1.  Corta distancia .....	24
3.4.2.  Larga distancia .....	25
<b>CAPÍTULO 4. Análisis de los resultados.....</b>	<b>27</b>
4.1.  Introducción .....	27
4.2.  Evaluación objetiva .....	27
4.2.1.  En el laboratorio .....	27
4.2.2.  En Walqa .....	28
4.2.3.  Fuera de Walqa .....	29

4.3. Evaluación subjetiva.....	30
4.3.1. En el laboratorio .....	31
4.3.2. En Walqa .....	31
4.3.3. Fuera de Walqa .....	32
4.4. Conclusión.....	33
 <b>CAPÍTULO 5. Conclusión final .....</b>	 <b>35</b>
5.1. Los resultados .....	35
5.2. Solución final.....	36
5.3. Líneas futuras.....	38
 <b>CAPÍTULO 6. Bibliografía y referencias .....</b>	 <b>39</b>
 <b>ANEXO A. Conceptos tecnológicos.....</b>	 <b>43</b>
A.1. Compresión .....	43
A.2. Calidad de la imagen .....	45
A.3. Streaming de vídeo .....	47
A.4. Tipos de redes .....	49
A.5. Control de acceso al medio.....	50
A.6. Certificadores y reguladoras.....	52
A.6.1. FCC (Federal Communications Commission) .....	52
A.6.2. ETSI (European Telecommunication Standard Institute).....	53
A.6.3. UL (Underwriters Laboratories Inc.) .....	53
A.6.4. WiFi (Alianza WiFi) .....	53
A.6.5. WLANA (Wireless LAN Asociation) .....	54
A.7. Bandas frecuenciales WiMAX .....	54
A.8. Femtoceldas .....	54
A.9. Zona de Fresnel .....	56
A.10. Antenas MIMO .....	57
A.11. Protocolo SNMP .....	58
 <b>ANEXO B. Análisis de las tecnologías .....</b>	 <b>61</b>
B.1. Telefonía móvil.....	61
B.1.1. Inicial y primera generación .....	62
B.1.2. Segunda generación .....	62
B.1.3. Tercera generación.....	64
B.2. OFDM .....	66
B.2.1. Ventajas.....	67
B.2.2. Inconvenientes.....	68
B.3. WiFi .....	69
B.4. Mobile-Fi .....	73

<b>B.5. WiMAX .....</b>	<b>75</b>
<b>B.6. COFDM .....</b>	<b>79</b>
<b>B.7. Tecnologías futuras, la 4G .....</b>	<b>82</b>
B.7.1.     LTE .....	82
B.7.2.     WiMAX 802.16m .....	83
 <b>ANEXO C. Soluciones en el mercado actual.....</b>	 <b>85</b>
 <b>ANEXO D. Emisión y captura .....</b>	 <b>87</b>
D.1.    Uso del VLC .....	87
D.2.    Capturadora HD Blackmagicdesign .....	90
 <b>ANEXO E. Equipos estudiados y/o utilizados en el proyecto .....</b>	 <b>93</b>
E.1.    Equipo preWiMAX fijo en banda libre de Alvarion .....	93
E.1.1.    Configuración de la red .....	93
E.1.2.    Configuración del equipo.....	93
E.1.3.    Monitorización .....	94
E.2.    Equipo WiMAX móvil estándar en banda licenciada de Motorola .....	94
E.2.1.    Configuración de la red .....	94
E.2.2.    Configuración del equipo.....	97
E.2.3.    Características de la red desde el cliente.....	97
E.2.4.    Características del tráfico desde el cliente .....	98
E.2.5.    Monitorización .....	98
E.3.    Analizador de calidad subjetiva TEKTRONIX PQA500.....	99
E.4.    Equipos usados en el resto de la cadena del piloto.....	99
E.4.1.    Generación de vídeo.....	99
E.4.2.    Conversión entre generación de vídeo y codificación.....	99
E.4.3.    Codificación y decodificación.....	99
E.4.4.    Alimentación .....	102
E.4.5.    Vehículo y anclaje.....	102
E.4.6.    Recepción .....	102
 <b>ANEXO F. Ampliación de resultados de las medidas .....</b>	 <b>103</b>
F.1.    Evaluación objetiva .....	103
F.1.1.    En el laboratorio .....	103
F.1.2.    En Walqa .....	103
 <b>ANEXO G. Metodología del análisis subjetivo y resultados .....</b>	 <b>113</b>
G.1.    Procedimiento.....	113
G.2.    Motivos por los que usamos este método .....	114
G.3.    Elección de los vídeos.....	115
G.4.    El visionado .....	117

G.5. Criterios para la preparación del escenario del visionado.....	119
G.6. Test para los observadores tras el visionado .....	119
G.7. Resultados del test .....	120
<b>ANEXO H. Solicitud banda licenciada .....</b>	<b>123</b>
H.1. Propuesta técnica.....	123
H.2. Resolución solicitud banda licenciada .....	129
H.3. Características del permiso.....	130
<b>ANEXO I. Linux y VPN .....</b>	<b>133</b>
I.1. Linux.....	133
I.2. VPN.....	135
I.2.1.     Descargar e instalar software .....	135
I.2.2.     Creación de claves y certificados .....	136
I.2.3.     Archivos de configuración .....	137
<b>ANEXO J. Fotos del proyecto .....</b>	<b>141</b>
J.1. Medidas con preWiMAX.....	141
J.2. Medidas con WiMAX móvil estándar.....	144

# Índice de figuras

1.3.1.	<i>Diagrama de Gantt del PFC</i> .....	5
2.3.1.	<i>Cobertura de tecnologías inalámbricas</i> .....	13
2.3.2.	<i>Distancia máxima y ancho de banda de tecnologías inalámbricas</i> .....	13
2.3.3.	<i>Ancho de banda de las tecnologías inalámbricas según su modulación</i> .....	14
2.3.4.	<i>Velocidad máxima soportada y ancho de banda de las tecnologías inalámbricas</i> .....	14
3.1.1.	<i>Configuración para uso del analizador de redes</i> .....	18
3.2.1.	<i>Configuración con los equipos preWiMAX</i> .....	19
3.2.2.	<i>Configuración con los equipos WiMAX móvil estándar</i> .....	21
3.4.1.	<i>Escenario de pruebas a corta distancia</i> .....	24
5.1.1.	<i>Representación de la influencia de la altura de las antenas en la comunicación</i> .....	35
A.1.1.	<i>Relación entre los tres tipos de frames</i> .....	44
A.2.1.	<i>Comparativa entre sistemas de pantalla</i> .....	46
A.3.1.	<i>Trama MPEG TS</i> .....	48
A.3.2.	<i>Pila de protocolos</i> .....	49
A.9.1.	<i>Explicación gráfica de la zona de Fresnel</i> .....	56
A.9.2.	<i>Línea de vista óptica y de radio</i> .....	56
B.3.2.	<i>Relación canales/frecuencia del estándar WiFi 802.11b</i> .....	72
B.5.1.	<i>Evolución de WiMAX</i> .....	76
B.6.1.	<i>División frecuencial y temporal</i> .....	81
B.6.2.	<i>Esquema del tiempo de guarda</i> .....	81
C.1.1.	<i>Solución LiveU de Mediapro y Park 7</i> .....	84
D.1.1.	<i>Paso 1 de la emisión de vídeo con el protocolo RTP con el software VLC</i> .....	87
D.1.2.	<i>Paso 2 de la emisión de vídeo con el protocolo RTP con el software VLC</i> .....	88
D.1.3.	<i>Paso 3 de la emisión de vídeo con el protocolo RTP con el software VLC</i> .....	88
D.1.4.	<i>Paso 4 de la emisión de vídeo con el protocolo RTP con el software VLC</i> .....	89
D.1.5.	<i>Recepción del vídeo</i> .....	90
E.1.1.	<i>Configuración de la red local del equipo conectado el cliente</i> .....	95
E.1.2.	<i>Configuración de la red local del equipo conectado a la estación base</i> .....	96
E.1.3.	<i>Configuración de la DMZ del cliente</i> .....	96
E.1.4.	<i>Configuración de la continuación de puertos en el cliente</i> .....	96
G.2.1.	<i>Relación entre el MOS y los paquetes perdidos en una transmisión de vídeo</i> .....	115
G.4.1.	<i>Televisores preparadas para el visionado</i> .....	118
H.1.1.	<i>Mapa de la zona de pruebas</i> .....	124
H.1.2.	<i>Elevación de la antena principal</i> .....	125
H.1.3.	<i>Azimut de la antena principal (en la misma polaridad)</i> .....	125
H.1.4.	<i>Azimut de la antena principal (polaridad inversa)</i> .....	126
H.1.5.	<i>Elevación de la diversidad de la antena</i> .....	126
H.1.6.	<i>Azimut de la diversidad de la antena (en la misma polaridad)</i> .....	127
H.1.7.	<i>Azimut de la diversidad de la antena (polaridad inversa)</i> .....	127
J.1.1.	<i>Estación base preWiMAX</i> .....	141
J.1.2.	<i>Escenario LOS visto desde el cliente preWiMAX</i> .....	142
J.1.3.	<i>Escenario OLOS visto desde el cliente preWiMAX</i> .....	142
J.1.4.	<i>Escenario NLOS con reflexión visto desde el cliente preWiMAX</i> .....	143
J.1.5.	<i>Escenario NLOS con una reflexión parcial visto desde el cliente preWiMAX</i> .....	143
J.2.1.	<i>Estación base WiMAX móvil estándar</i> .....	144
J.2.2.	<i>Cliente WiMAX móvil estándar apuntando a la estación base en LOS</i> .....	145
J.2.3.	<i>Escenario OLOS visto desde el cliente WiMAX móvil estándar</i> .....	145
J.2.4.	<i>Escenario NLOS con reflexión visto desde el cliente WiMAX móvil estándar</i> .....	146
J.2.5.	<i>Escenario OLOS a 5 Km visto desde el cliente WiMAX móvil estándar</i> .....	146
J.2.6.	<i>Estación base WiMAX móvil estándar apuntando a Loarre</i> .....	147
J.2.7.	<i>Cliente WiMAX móvil estándar situado en Loarre, escenario LOS</i> .....	147



# Índice de tablas

1.3.1.	<i>Datos para la elaboración del diagrama de Gantt</i> .....	4
2.2.3.	<i>Mejoras del estándar 802.16e frente al estándar 802.16e</i> .....	11
2.3.1.	<i>Comparación entre las posibles tecnologías para nuestra solución</i> .....	15
4.3.1.	<i>Resultados subjetivos obtenidos en el visionado</i> .....	31
5.1.1.	<i>Distancia máxima de las antenas dependiendo únicamente de la frecuencia y altura de las mismas</i> .....	36
B.1.1.	<i>Evolución de la telefonía móvil y lugar donde se enmararía WiMAX móvil</i> .....	61
B.1.2.	<i>Características de las bandas de GSM</i> .....	63
B.3.1.	<i>Ancho de banda y frecuencia de transmisión de los estándares a/b/g/n</i> .....	70
E.5.1.	<i>Comparación entre codificadores</i> .....	101
F.1.1.	<i>Monitorización del equipo preWiMAX para un escenario LOS a 100 m. aprox. de distancia</i> .....	104
F.1.2.	<i>Monitorización del equipo WiMAX móvil estándar para un escenario LOS a 100 m. aprox de distancia</i> .....	105
F.1.3.	<i>Monitorización del equipo preWiMAX para un escenario OLOS a 100 m. aprox. de distancia</i> .....	106
F.1.4.	<i>Monitorización del equipo WiMAX móvil estándar para un escenario OLOS a 100 m. aprox. de distancia</i> .....	107
F.1.5.	<i>Monitorización del equipo preWiMAX para un escenario NLOS con una reflexión a 100 m. aprox. de distancia</i> .....	108
F.1.6.	<i>Monitorización del equipo WiMAX móvil estándar para un escenario NLOS con una reflexión a 100 m. aprox. de distancia</i> .....	109
F.1.7.	<i>Monitorización del equipo preWiMAX para un escenario NLOS en el que comenzamos apuntando hacia una caseta que refleja hacia espacio abierto, después de manera que la señal llegue con doble reflexión y finalmente orientada hacia el espacio abierto, todo a 100 m. aprox. de distancia</i> .....	109
F.1.8.	<i>Monitorización del equipo WiMAX móvil estándar para un escenario NLOS en el que apuntamos tal y como se indica en cada caso, todo a 100 m. aprox. de distancia</i> .....	110
F.1.9.	<i>Monitorización del equipo preWiMAX para un escenario móvil a unos 100 m. aprox. de radio de distancia</i> .....	110
F.1.10.	<i>Monitorización del equipo WiMAX móvil estándar para escenarios móviles y estáticos a larga distancia</i> .....	111
G.7.1.	<i>Resultados subjetivos del visionado</i> .....	120
H.1.1.	<i>Propuesta técnica para el servicio fijo</i> .....	128







# Capítulo 1: Introducción y objetivos.

## 1.1. Marco del proyecto.

### 1.1.1. *Introducción.*

Este proyecto nació como una idea de Aragón Telecom para cubrir una necesidad de Aragón TV y finalmente para su desarrollo se integró la ayuda del ITA (Instituto Tecnológico de Aragón).

La problemática se estudió a fondo en la empresa pública Aragón Telecom y posteriormente se realizó la parte práctica en las instalaciones del parque tecnológico Walqa (Huesca) pertenecientes al ITA, que mostró interés por el objetivo del proyecto y su futuro desarrollo.

### 1.1.2. *Situación actual de Aragón TV.*

En la actualidad, Aragón TV dispone de dos posibles soluciones para llevar a cabo la emisión de directos fuera de sus instalaciones en Zaragoza capital, donde tiene su control central.

Por un lado, en Zaragoza capital y cuando la situación lo permite (edificios cercanos y otros posibles obstáculos no interfieren demasiado) se hace uso de la tecnología COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), una solución propietaria de cada fabricante basada en OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Trabaja en el rango de frecuencias de la FORTA (Federación de Organismos de Radio y Televisión Autonómicos), de manera que se puede emitir con potencias superiores a la banda no licenciada con resultados positivos en prácticamente todos los escenarios.

Para el resto de los casos, la transmisión se realiza vía satélite. Es una solución más fiable porque siempre hay línea de vista, dado que es relativamente sencillo apuntar al cielo aunque haya que usar una alargadera o transmisión inalámbrica COFDM para la cámara y situar la furgoneta en un espacio abierto. Además es la de mayor calidad porque se puede alquilar un ancho de banda muy superior al necesario, permitiendo contenido HD (*High Definition*) o incluso 3D. Por el contrario, presenta una mayor

latencia y es una solución muy cara, concretamente a la cadena de televisión NBC le cuesta unos 3.000 \$ diarios contratar una unidad móvil con conexión a satélite.

### ***1.1.3. Aragón Telecom.***

De acuerdo con lo previsto en el I Plan Director de Infraestructuras de Telecomunicaciones de Aragón, aprobado por el Consejo de Gobierno de Aragón el día 24 de Enero de 2006, el Departamento de Ciencia, Tecnología y Universidad del Gobierno de Aragón decidió desplegar una Red Pública de Infraestructuras de Telecomunicaciones, dividida en distintas fases, para lo que se creó la empresa pública Aragón Telecom.

Entre sus funciones, destaca la creación de una red de infraestructuras (emplazamientos, torres y casetas) totalmente equipadas funcionalmente para la materialización de los centros emisores TDT y de radiofrecuencia necesarios y escalable para poder alojar servicios futuros, como el que se trata en este Proyecto Fin de Carrera. En concreto, se trata de una red de transporte multiservicio de alta capacidad que facilite el aprovechamiento y despliegue de redes y servicios en todo el territorio aragonés de forma rápida y eficiente en las mismas condiciones de accesibilidad, independientemente del lugar donde desarrolle su actividad, reduciendo así la denominada “brecha digital”. Esta red, denominada Red Pública de Infraestructuras de Telecomunicaciones de Aragón (REPITA) está formada por una serie de conductos y tendido de fibra óptica entre al menos las capitales de provincia y, en su parte radio, por una red troncal, formada por un conjunto de centros unidos por medio de radioenlaces con una topología de 5 anillos para tener redundancia con tecnología SDH 2xSTM-1 (1,5 Gbps), y una red de distribución PDH (64 Mbps), que partiendo de los centros de la red troncal proporciona capilaridad a la red.

### ***1.1.4. ITA (Instituto Tecnológico de Aragón).***

El Instituto Tecnológico de Aragón es un Centro Tecnológico de carácter público cuya misión es contribuir a la promoción y ejecución de la investigación y el desarrollo, con arreglo a los criterios del interés general, orientando su actividad a impulsar la innovación tecnológica de las empresas. Sus funciones principales son:

- Ofrecer servicios tecnológicos a la industria.
- Identificar y atender las necesidades de innovación de los diferentes sectores productivos, con especial orientación a pequeñas y medianas empresas.
- Prestar servicios de ensayo y calibración de aparatos y equipos.
- Promover la participación de las empresas en programas de renovación tecnológica, tanto nacionales como internacionales.

- Fomentar el desarrollo tecnológico y la investigación al servicio de las administraciones públicas.

Dentro de los proyectos nacionales en los que trabaja actualmente el ITA destaca el CETVI (Centro de Referencia sobre Televisión Interactiva), nuevo centro gestionado por el Instituto Tecnológico de Aragón que tiene como objetivo principal poner en marcha un centro que recoja y desarrolle experiencias de referencia sobre servicios interactivos de Televisión Digital, que evalúe y difunda servicios y terminales sobre redes de nueva generación (incluidas TDT e IPTV), tanto en el hogar como en movilidad dentro del entorno de vida asistida. En este centro, ubicado en el Parque Tecnológico Walqa, es donde se desarrolló la parte práctica de mi proyecto.

## 1.2. Objetivos del PFC.

Las principales necesidades que se desean solucionar con este proyecto son:

- Ofrecer a todo el territorio aragonés de una alternativa al satélite.
- Generar una alternativa de transmisión que permita un ahorro económico respecto a satélite.
- Solución mixta dependiendo de las condiciones del directo. No depender de una sola tecnología, sino poder elegir entre distintas soluciones y escoger la más apropiada dependiendo del directo: Antelación con la que se conoce, calidad de transmisión necesaria...
- Mejora de la calidad de imagen (por ej. usando compresión MPEG-2 4:2:2 en lugar de MPEG-2 4:2:0). De esta manera se podría usar esta solución también para secuencias de mayor frecuencia (mayor movimiento de pixeles) que las generadas en los directos habituales, en los que la compresión es alta porque en la mayoría de los casos es una imagen casi fija (reportero) con fondo poco móvil.
- Despliegue rápido. Como la gran mayoría de los directos se conocen con días de antelación, el enlace puede prepararse con un día de antelación.

## 1.3. Planificación.

Al comienzo del PFC, se desarrolló un diagrama de Gantt. Éste, fue evolucionando y modificándose a lo largo de todo el PFC debido a depender de factores externos.

Algunas de estas desviaciones fueron: la adaptación a la reducida disponibilidad de los equipos prestados, la solicitud del uso de frecuencias de la banda licenciada, la necesidad de la modificación de la metodología de actuación debido a la prevención de riesgos...

La última versión de los datos necesarios para su elaboración se muestra en la siguiente tabla:

Nombre de la tarea	Duración	Comienzo	Fin
<i>Redacción del PFC</i>	224 días	mar 06/04/10	vie 11/02/11
<i>Depósito del PFC</i>	1 día	vie 18/02/11	vie 18/02/11
<i>Estudio del problema</i>	62 días	mar 06/04/10	mié 30/06/10
<i>Búsqueda de soluciones</i>	83 días	jue 01/07/10	dom 24/10/10
<b><i>Puesta en marcha WiMAX en laboratorio</i></b>	<b>27 días</b>	<b>lun 25/10/10</b>	<b>mar 30/11/10</b>
<i>Configuración equipos WiMAX</i>	6 días	lun 25/10/10	dom 31/10/10
<i>Ping entre equipos WiMAX</i>	3 días	lun 01/11/10	mié 03/11/10
<i>Preparación de vídeos para las pruebas</i>	8 días	jue 04/11/10	dom 14/11/10
<i>Transmisión de vídeo con VLC</i>	7 días	lun 15/11/10	mar 23/11/10
<i>Test unitario de laboratorio</i>	8 días	dom 21/11/10	mar 30/11/10
<i>Diseño de los escenarios</i>	4 días	mié 01/12/10	dom 05/12/10
<i>Petición de frecuencia en 3.5 GHz</i>	34 días	mié 01/12/10	dom 16/01/11
<b><i>Puesta en marcha preWiMAX en laboratorio</i></b>	<b>8 días</b>	<b>mié 01/12/10</b>	<b>dom 12/12/10</b>
<i>Configuración equipos preWiMAX</i>	4 días	mié 01/12/10	dom 05/12/10
<i>Ping entre equipos preWiMAX</i>	2 días	lun 06/12/10	mar 07/12/10
<i>Transmisión de vídeo con VLC</i>	4 días	mié 08/12/10	dom 12/12/10
<b><i>Pruebas de Sistema</i></b>	<b>64 días</b>	<b>lun 15/11/10</b>	<b>jue 10/02/11</b>
<i>Medidas en campo con preWiMAX y análisis de los resultados</i>	46 días	lun 15/11/10	dom 16/01/11
<i>Medidas en campo con WiMAX y análisis de los resultados</i>	19 días	lun 17/01/11	jue 10/02/11
<i>Préstamo de equipos codificadores, magnetoscopio y monitor</i>	8 días	mié 09/02/11	vie 18/02/11
<i>Montaje y medidas del piloto</i>	6 días	vie 11/02/11	vie 18/02/11

Tabla 1.3.1. Datos para elaboración del diagrama de Gantt.

En negrita se indican las tareas divididas en varias fases, las cuales están en las siguientes filas con un sangrado inicial.

Estas tareas están representadas con una barra gris finalizada en dos flechas, como se puede ver en el diagrama de Gantt:

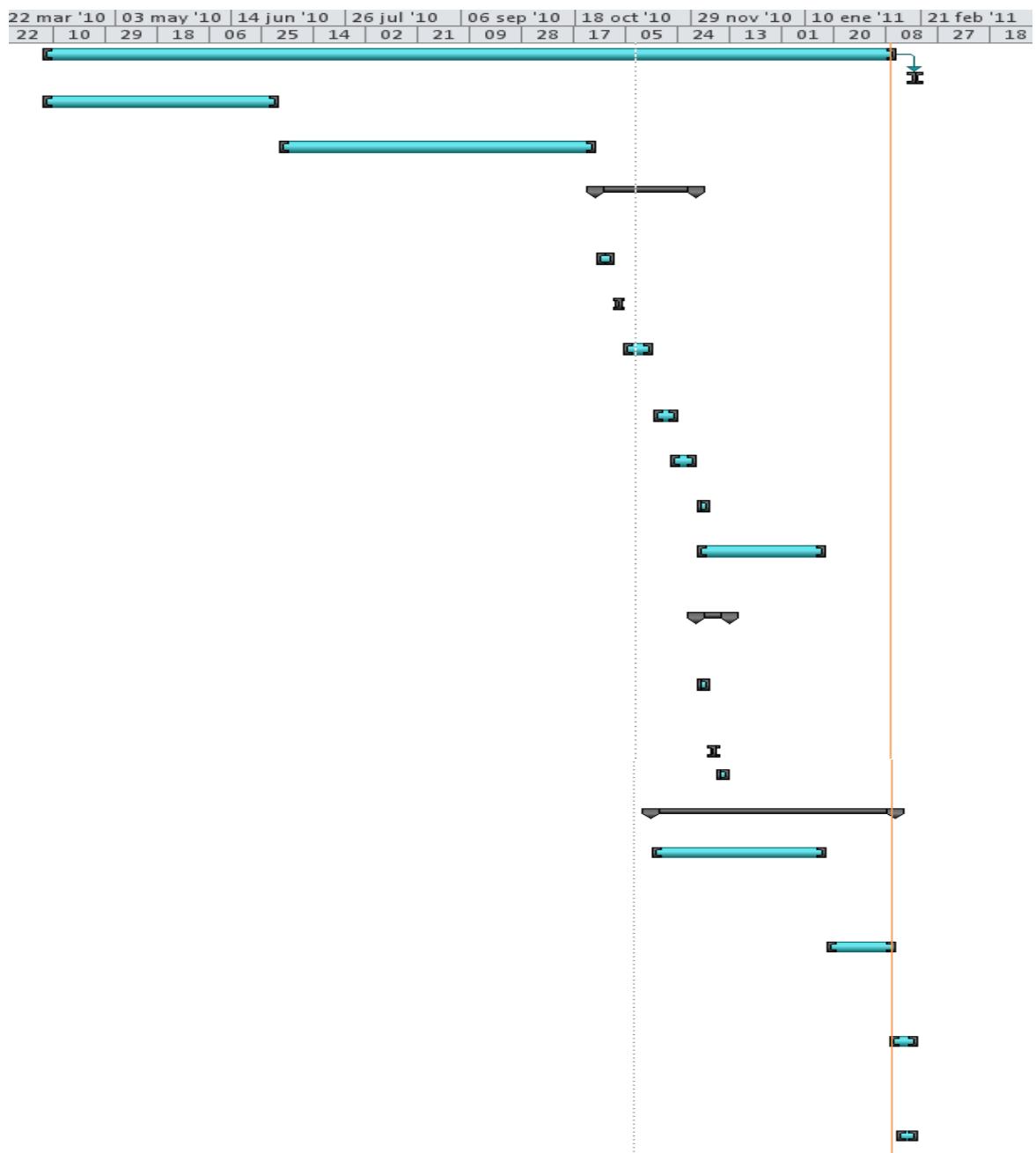


Figura 1.3.1. Diagrama de Gantt del PFC.



# Capítulo 2: Análisis tecnológico.

## 2.1. Introducción.

Para saber qué solución tecnológica se adapta mejor a nuestro problema debemos conocer qué factores nos afectan y en qué grado, de manera que valoremos el compromiso entre ellos. En este caso voy a dividirlos en dos grupos:

### 2.1.1. Factores técnicos.

**Móvil y ligero:** Dependiendo de la solución se trataría de un sistema furgoneta, furgoneta-mochila o mochila solamente.

**Visión que necesita:** Puede precisar línea de vista directa (LOS, *Line Of Sight*), soportar pequeños y/o grandes obstáculos en la región de Fresnel sin cortar la línea de vista (OLOS, *Obstructed Line Of Sight*) o no tener línea de vista y verse obligado a buscar una o más reflexiones (NLOS, *Non Line Of Sight*). La zona de Fresnel viene explicada en el anexo 9 del apartado A.

**Distancia máxima:** No tenemos un valor claramente definido para este requisito, pero, independientemente de los factores que comentamos a continuación, debe ser del rango de kilómetros. Está dada por el número de centros de los que dispongamos, cómo estén distribuidos, las condiciones de visión y la tasa de tráfico deseada. Además, dependiendo de la modulación utilizada tendremos un compromiso entre distancia máxima de transmisión y ancho de banda disponible.

**Ancho de banda máximo del canal ascendente:** A pesar de que el sistema tenga un gran ancho de banda, debemos atender a que sea el enlace ascendente (desde la cámara a la estación base que una con el control central) el que pueda proporcionar tráfico de 4 a 5 Mbps para compresión MPEG-2 y de 2 a 3 Mbps para MPEG-4, como hemos comentado en los objetivos del PFC en el apartado 1.3.

**Latencia:** Tecnologías con un retardo de segundos no son válidas en caso de desearse hacer una intercomunicación con plató, puesto que el retardo entorpecería o imposibilitaría el diálogo.

**Cobertura:** Nos interesa una cobertura de celda, no demasiado pequeña. También es valorable si puede interconectarse con otras celdas de manera que forme una red, multiplicando así la distancia máxima.

**QoS (Calidad de Servicio):** Para una emisión televisiva es imprescindible garantizar una calidad de servicio, puesto que es inadmisible una pantalla congelada durante un directo. Se ha de asegurar el ancho de banda, retardo y pérdida máxima de paquetes del servicio.

**Equipamiento comercial:** La disponibilidad de los equipos en el mercado.

**Fiabilidad:** Hasta tener el enlace montado no podemos asegurar cómo de robusto es frente a condiciones adversas de ruido, interferencias...

**Fácil montaje:** Como comentábamos en los objetivos se desea un despliegue rápido. Con un fácil montaje nos referimos a su colocación, configuración y uso. Para soluciones de despliegue inmediato precisaríamos uso de únicamente una mochila o conexión a satélite, pero en la gran mayoría de los casos los directos se conocen con días de antelación.

## 2.1.2. *Factores económicos.*

**Inversión inicial:** El precio de los equipos y de la instalación, independientemente de los costes que impliquen posteriormente.

**Mantenimiento:** Podemos clasificar los gastos de mantenimiento como una alta inversión debida al alquiler de un servicio o red a un operador comercial y baja inversión en caso de realizarse una compra de los equipos, en lugar de un servicio, y no ser necesario el alquiler de una red.

**Uso de la red REPITA:** Si se puede aprovechar la infraestructura de la DGA (Diputación General de Aragón) se ahorran los costes de alquiler y, como comentábamos en los apartados anteriores, se reduce la inversión inicial y costes de mantenimiento.

**Banda licenciada:** Nos encontramos ante un compromiso entre el precio a pagar a la operadora que posee parte de esa banda licenciada y la posibilidad de emitir a una potencia mayor en las bandas licenciadas, que se pueden ver en el apartado 7 del anexo A.

Para el caso de WiMAX en banda no licenciada la potencia máxima de emisión es 100 mW de PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) para la banda de 2,4 GHz (hasta el momento no usada en España para WiMAX, pero en otros países se ha gestionado como banda libre) y 1 W para la banda de 5,4 GHz. Para la también banda no licenciada de 5,8 GHz, establecida en España en el 2010, se permite una potencia de emisión de hasta 4 W PIRE, haciéndola preferible a 5,4 GHz. Este incremento de la potencia máxima permitida tiene su origen en el principio de que la atenuación aumenta con el cuadrado de la frecuencia, por lo que dotaron a esta banda de ese nivel mayor para contrarrestar su alta frecuencia de transmisión.

**Reúso de servicios:** En el caso de poder utilizar la tecnología elegida para dar otros servicios de manera simultánea o mientras no esté en uso, el coste global se ve reducido notablemente.

## 2.2. Análisis de tecnologías.

En el anexo B vemos una explicación ampliada de la evolución de las tecnologías inalámbricas, haciendo hincapié en las de mayor utilidad para este proyecto. En este apartado comentamos brevemente las candidatas actuales a ser solución para nuestro problema, sus ventajas y limitaciones. Algunas de sus aplicaciones para la transmisión de directos pueden verse en el anexo C.

### 2.2.1. *Telefonía móvil 3G.*

Las principales ventajas de las soluciones basadas en telefonía móvil 3G, ampliadas en el apartado 1 del anexo B [1] [2] [3] [4]) son:

- No hay cables hasta ninguna unidad móvil, por lo que no hay limitaciones de distancia.
- El equipo permite emitir en movimiento: desde un coche, un globo, un paracaídas o una moto, sin producir ningún corte en la emisión.
- También es posible emitir en tierra o bajo tierra, y allá donde haya cobertura: una de las pruebas de emisión ha sido emitir durante el recorrido de una línea de metro.
- Los equipos de televisión pueden reaccionar más rápido ante eventos inesperados: este sistema está en plena emisión en directo en menos de un minuto.
- El coste del equipo es mucho menor que lo que cuesta una conexión por satélite o microondas. Esto quiere decir que podrán acceder a los directos cadenas tradicionales y cadenas IPTV (televisión sobre tecnología IP) con menor presupuesto.
- Permite tener más equipos en directo simultáneamente para un mismo programa.
- IP basado en paquetes, pues solo pagas en función de la descarga lo que supone relativamente un menor costo. Aunque dependiendo del tipo de usuario también se podría calificar como desventaja.
- Velocidad de transmisión alta: fruto de la evolución de la tecnología hoy en día se pueden alcanzar velocidades superiores a los 3 Mbit/s por usuario móvil.

- UMTS, sumado al soporte de protocolo de Internet (IP), se combinan poderosamente para prestar servicios multimedia y nuevas aplicaciones de banda ancha, tales como servicios de video-telefonía y video-conferencia.
- Además de en TV, pueda asimismo exportarse a otros como pueden ser la seguridad ciudadana, la mejora de la cobertura en situaciones de emergencia o en aplicaciones móviles para el usuario final.

Por el contrario, los inconvenientes de las soluciones basadas en telefonía móvil:

- No es totalmente seguro que un contrato “*premium*” con la operadora de 3G pueda garantizar la calidad de servicio necesaria para la transmisión de vídeo.
- Cobertura limitada. Dependiendo de la localización y la velocidad de transferencia puede disminuir drásticamente (o incluso carecer totalmente de cobertura).
- Disminución de la velocidad si el dispositivo desde el que nos conectamos está en movimiento (por ejemplo si vamos circulando en automóvil).
- No orientado a conexión. Cada uno de los paquetes pueden seguir rutas distintas entre el origen y el destino, por lo que pueden llegar desordenados o duplicados. Sin embargo el hecho de no ser orientado a conexión tiene la ventaja de que no se satura la red. Además para elegir la ruta existen algoritmos que “escogen” qué ruta es mejor, estos algoritmos se basan en la calidad del canal, en la velocidad del mismo y, en algunos, oportunidad hasta en 4 factores (todos ellos configurables) para que un paquete “escoja” una ruta.

## 2.2.2. WiFi.

WiFi [5] está diseñado para redes LAN de corto alcance, por lo que podría usarse como solución inmediata para distancias cortas en el problema de emisiones de directos de TV al que nos enfrentamos o únicamente como enlace entre la cámara y la furgoneta, en caso de ser necesario.

## 2.2.3. WiMAX.

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) es una tecnología radio de banda ancha para redes metropolitanas basada en los estándares desarrollados por el grupo IEEE 802.16 y adoptados tanto por el IEEE [6] (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*, explicado junto al resto de certificadores y reguladoras en el apartado 6 del anexo A). De igual manera, colaboran en su desarrollo el grupo HIPERMAN del ETSI [7] (*European Telecommunications Standards Institute*) en Europa y el FCC [8] (*Federal Communications Commission*) en Estados Unidos. Los

desarrollos de productos que cumplen estos estándares están promovidos por el consorcio industrial WiMAX Forum [9].

Parámetro	802.16d (TDD)*	802.16e (TDD)*	Ventajas de 802.16e
<i>Método de acceso</i>	OFDM	S-OFDMA	Por ser OFDMA reparte las portadoras ortogonales entre varios usuarios de manera inteligente y por ser S-OFDMA ( <i>Scaled – Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> ) además es escalable, facilitando: 1. Escalabilidad del ancho de banda. 2. Una mayor inmunidad a interferencias y a desvanecimientos de la señal.
<i>BW (MHz)</i>	3.5	5, 8,75, 10	Puede dar tasas de transmisión mayores.
<i>FFT size</i>	256	512,1024, 2048	FFT de más muestras proporciona mejores resultados para NLOS, resistencia ante distorsión multicamino y desvanecimientos de señal.
<i>HARQ</i>	No	Sí	HARQ provee una mayor cobertura, mejorando la inmunidad ante las interferencias y una más rápida corrección de errores.
<i>Esquemas de reúso de frecuencias</i>	No	Sí	Mejora de la eficiencia espectral, permitiendo el diseño de un esquema de reúso, de manera que los operadores podrán utilizar la misma frecuencia en todos los sectores.
<i>Multicast/ Broadcast</i>	No	Sí	Posibilidad de nuevos servicios, como podría ser servicio de internet, televisión de pago...
<i>MIMO</i>	MIMO A	MIMO A y MIMO B	MIMO A y MIMO B son tecnologías de antena inteligentes que proporcionan una mayor capacidad y cobertura.
<i>Servicio de encuesta extendido en tiempo real</i>	No	Sí	Las soluciones de servicio de encuesta extendido en tiempo real para mejorar la localización de ancho de banda y servicios en tiempo real, como calidad de voz.
<i>CTC (Convolution Turbo Coding)</i>	No	Sí	La codificación de convolución turbo incrementa la sensibilidad y mejora la capacidad del enlace y la cobertura del sector.

Tabla 2.2.3. Mejoras del estándar 802.16e frente al estándar 802.16d.

\*Aunque OFDD es TDD (*Time Division Duplex*) y FDD (*Frequency Division Duplex*), los equipos existentes hasta el momento en el mercado no implementan FDD, sólo TDD.

Una buena manera de ver las mejoras incluidas en el estándar de WiMAX móvil (802.16e) frente al estándar de WiMAX fijo (802.16d) y las ventajas del primero es a partir de la tabla 2.3. El conjunto de mejoras frente a desvanecimientos, distorsión multicamino... son las que posibilitan la comunicación móvil hasta 120 Km/h. La información de WiMAX está ampliada en el apartado 5 del anexo B [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17].

La norma vigente en la actualidad es la 802.16-2009, que compila todas las anteriores: 802.16-2004, 802.16-2004/Cor 1, 802.16e, 802.16f, 802.16g y 802.16i.

Además de su uso para los directos de TV, otra de sus aplicaciones encaja en ofrecer servicios a zonas rurales de difícil acceso, a las que no llegan las redes cableadas. Ya en la actualidad se está utilizando en escenarios de emergencia, para monitorizar el tráfico de las carreteras en tiempo real y como sistema radio interno de la policía, eso sí, en banda licenciada.

La mayor desventaja que podemos encontrar en WiMAX frente a satélite o 3G es su cobertura, puesto que para que exista un enlace debemos tener línea de vista o algunos casos concretos sin visión directa.

## 2.2.4. COFDM.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), como se explica en el apartado 5 del anexo A, es una técnica compleja de modulación de banda ancha utilizada para transmitir información digital a través de un canal de comunicaciones.

COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [18] además combina potentes métodos de codificación y entrelazado para la corrección de errores en el receptor. Pero realmente todas las tecnologías OFDM lo hacen, por lo que no existen sistemas OFDM y sistemas COFDM, sino que todos son COFDM. Sin embargo, el nombre COFDM es el que ha quedado para estos sistemas propietarios como si fuera diferente del OFDM de los sistemas estandarizados, aunque no lo sea.

En el mercado actual podemos encontrar múltiples soluciones propietarias de distintos fabricantes. Esto nos proporciona la ventaja de poder obtener soluciones que se adapten a nuestro problema, incluso personalizadas. Por el contrario, no tenemos la optimización propia de los estándares ni la interoperabilidad entre equipos de distintos modelos estandarizados, por lo que el gasto necesario para un cambio de fabricante sería equivalente al de una nueva inversión inicial.

COFDM posee la misma capa física que OFDM, por lo que modula la información en múltiples frecuencias portadoras ortogonales donde cada una está modulada en amplitud y fase y lleva una tasa de símbolos muy baja además de tener una alta eficiencia

espectral. Se obtiene una modulación específicamente diseñada para combatir los efectos multirayos y otros tipos de interferencias que afectan a receptores.

Su uso es especialmente apropiado para las necesidades de los canales de difusión terrestre, utilizando el DAB (*Digital Audio Broadcasting*) y los sistemas de televisión digital terrestre.

## 2.3. Comparativa entre las tecnologías.

Una primera comparativa entre tecnologías es la relativa al tipo de red para la que fueron diseñadas y la cobertura de cada una de ellas, que puede verse en la figura 2.3.1 y 2.3.2, respectivamente. Una explicación de los tipos de redes viene ampliada en el apartado 4 del anexo A.

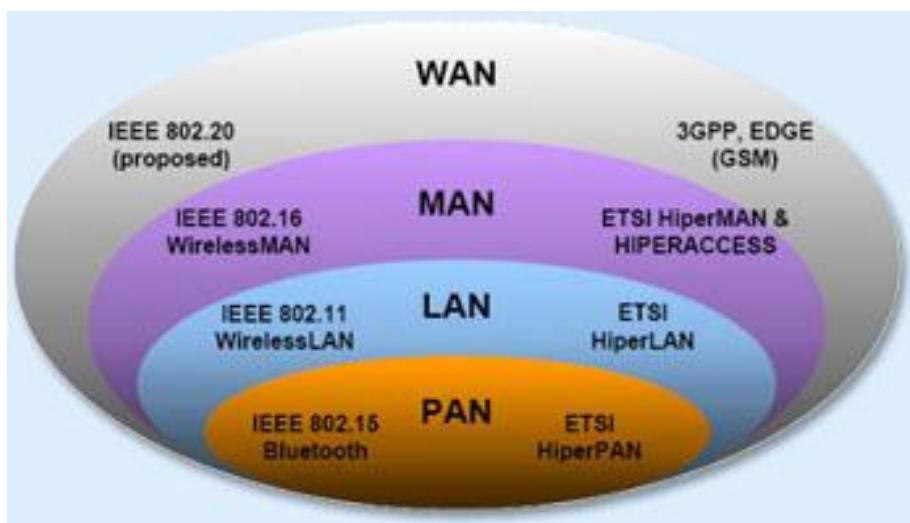


Figura 2.3.1. Cobertura de tecnologías inalámbricas.

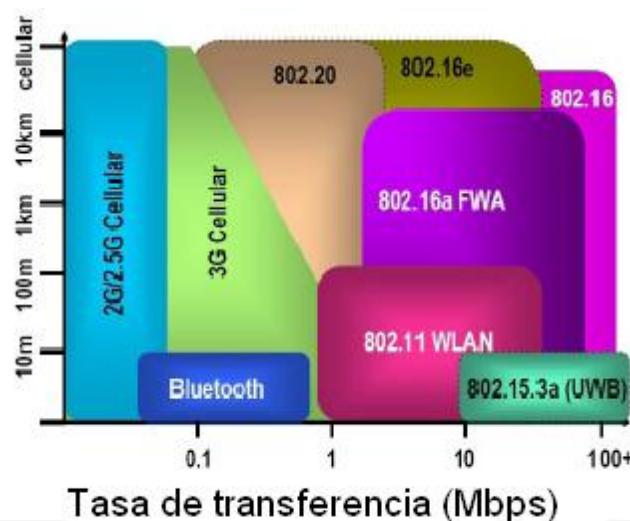


Figura 2.3.2. Distancia máxima y ancho de banda de tecnologías inalámbricas.

Una segunda comparativa viene dada por el ancho de banda que puede proporcionar cada tecnología. En la Figura 2.3.3 vemos su evolución dependiendo de la modulación usada.

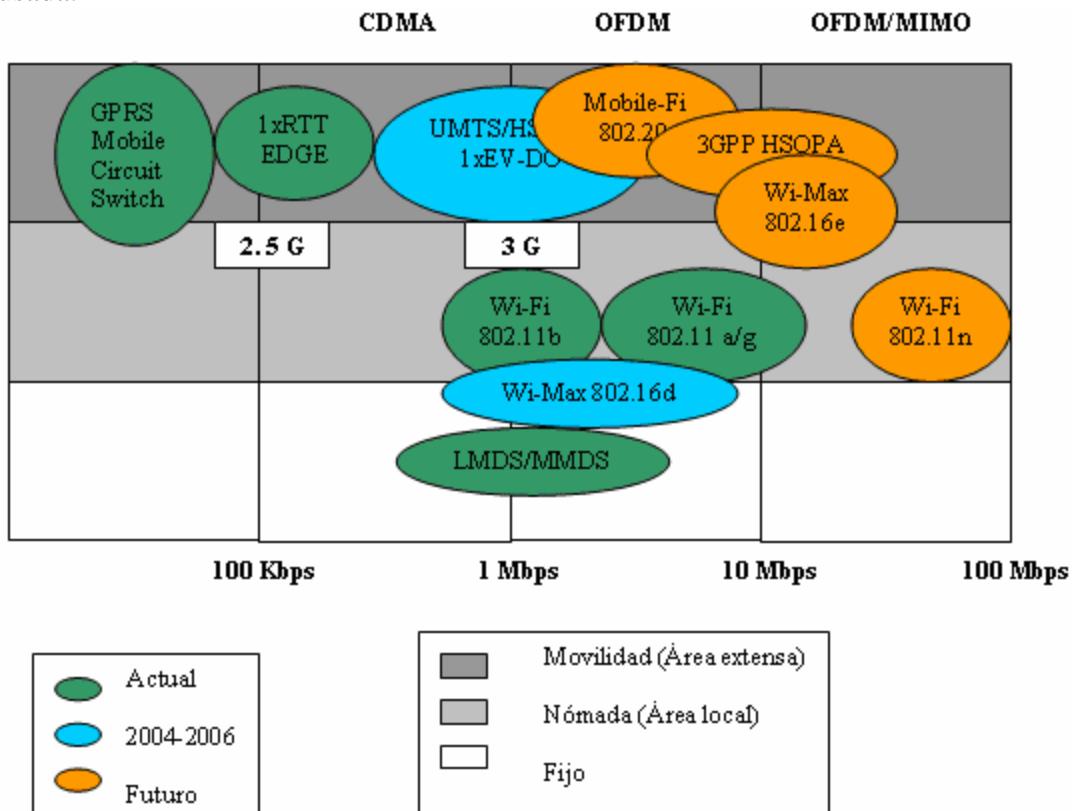


Figura 2.3.3. Ancho de banda de las tecnologías inalámbricas según su modulación.

En tercera instancia vemos la última comparativa, respecto a la movilidad del escenario que soporta cada tecnología y de nuevo el ancho de banda máximo que ofrecen.

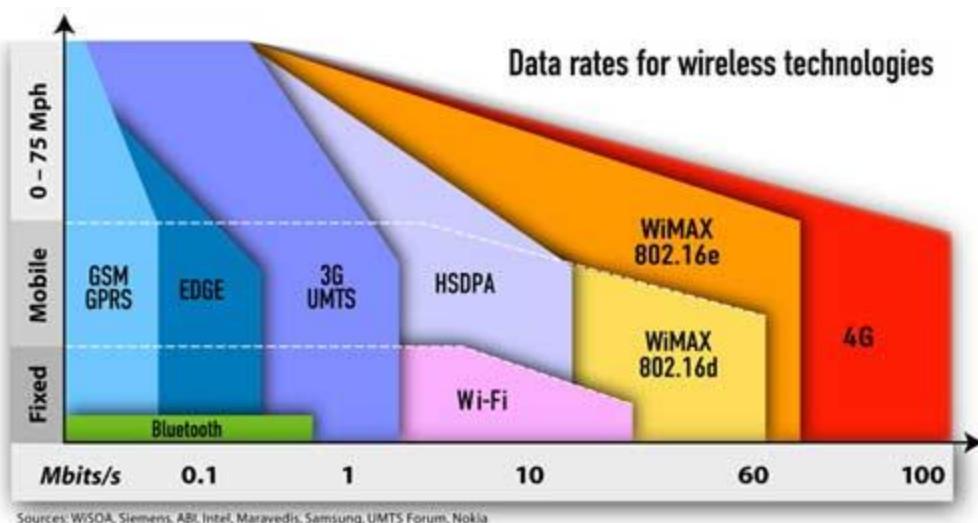


Figura 2.3.4. Velocidad máxima soportada y ancho de banda de las tecnologías inalámbricas.

Por último, en la siguiente tabla [19] [20] mostramos los factores a tener en cuenta a la hora de nuestra elección final y las características de cada tecnología de manera que sea

más sencilla la comparación. Incluimos la tecnología Mobile-Fi [21] que analizamos en el apartado 4 del anexo B a pesar de que en la actualidad su estándar (802.20) se encuentra parado y no es fácil encontrar su equipamiento comercial.

	Telefonía	WiFi	Mobile-Fi	WiMAX fijo	WiMAX móvil	COFDM
Estándar	(UMTS) 3G	802.11	802.20	802.16d	802.16e	Solución propietaria
<b>Factores técnicos</b>						
Móvil y ligero	SÍ	"SÍ"	SÍ	"SÍ"	SÍ	"SÍ"
Visión	NLOS	NLOS	NLOS	"NLOS"	"NLOS"	NLOS
Distancia máxima	10 Km/celda	100 m	20 Km	25 Km	20 Km	20 Km
Ancho de banda máximo del canal ascendente (Mbps)	2	11-54	16	34	34	30
Latencia máxima	Hasta 15 s (buffer)	5 ms	15 ms	10 ms	10 ms	10 ms
Cobertura	Red global	Núcleos	Enlace	Celda y red	Celda y red	Celda
QoS	NO	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
Equipamiento	SÍ	SÍ	SÍ (escaso)	SÍ	SÍ	SÍ
Fiabilidad	"SÍ"	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
Fácil montaje	SÍ	SÍ	"SÍ"	"SÍ"	"SÍ"	"SÍ"
<b>Factores económicos</b>						
Inversión inicial	BAJA	BAJA	ALTA	MEDIA	MEDIA	ALTA
Mantenimiento	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA
Uso de la REPITA	NO	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Banda licenciada	SÍ	NO	SÍ	SÍ / NO	SÍ / NO	SÍ / NO
Reúso servicios	NO	SÍ	NO	SÍ	SÍ	SÍ

**Tabla 2.3.1. Comparación entre las posibles tecnologías para nuestra solución.**

Las celdas rellenas con una respuesta entrecomillada se refieren a características que posee dicha tecnología, aunque no está diseñado ex profeso para tal, por lo que su funcionalidad no será óptima.

En el apartado fiabilidad cabe destacar que la telefonía la puede proporcionar a costa de retardo y un gran buffer que pueda compensar las caídas de señal. Por su parte, WiMAX sí puede asignar un canal determinado a un cliente y/o servicio.

## 2.4. Conclusión.

Por todo lo visto en este capítulo, la tecnología actual que mejor se adapta a nuestro problema es WiMAX y preferiblemente, puesto que es el último estándar y una evolución de los anteriores, WiMAX móvil.

En el apartado 7 del anexo B y en las conclusiones se analizan futuras tecnologías que presentan mejores prestaciones, pero todavía no están implantadas, por lo que no se tratan en este capítulo como alternativas inmediatas.

WiMAX es una tecnología muy adecuada para establecer radioenlaces debido a su gran alcance, alta capacidad y QoS, y a un coste muy competitivo frente a otras alternativas.

Otra de sus mayores ventajas frente a sus predecesores va orientada a los directos en movimiento, dado que es el único que proporciona handover, es decir la transferencia a otra celda sin corte de la comunicación.

Como se puede extraer fácilmente de la tabla comparativa, cumple con todos los requisitos y en algunos con creces. Por esta razón, además de tener unos gastos de mantenimiento bajos dado que usa la red REPITA, se podrá amortizar más rápido la inversión inicial reusando este excedente de requisitos para solucionar otros problemas, como podría ser dar cobertura internet rural en alguna zona.

La segunda mejor opción sería contratar un servicio a un operador de telefonía móvil. El coste inicial es cero, y el mantenimiento puede ser bastante bajo, pero sólo proporciona mejores tasas en el caso de HSUPA y HSPA+, que todavía no tienen demasiada cobertura autonómica. Además esta tecnología no da la posibilidad de reusarla para otros servicios.

Además tiene canal de retorno que, aunque no era uno de los objetivos del proyecto, puede ser un interesante punto a tratar en estudios futuros, dado que sería interesante para una intercomunicación entre el reportero y el control central o el plató de televisión desde el que se realiza la conexión.

# Capítulo 3: Metodología del desarrollo.

## 3.1. Introducción.

Una vez elegida WiMAX como la tecnología que en la actualidad se adapta mejor a nuestro problema de transmisión de un directo de televisión, nos enfrentamos al problema de cómo realizar su evaluación.

Por un lado está la elección de las herramientas que vayan a usarse y por otro la posibilidad de emular las pruebas en laboratorio o realizar pruebas reales en campo. Dependiendo de esa decisión podremos realizar el montaje que nos interesa cuantificar de canal ascendente o, si no es posible, una configuración de ida y vuelta en la que tendremos que hacer suposiciones para extraer la información de sólo la ida.

## 3.2. Diseño de la configuración.

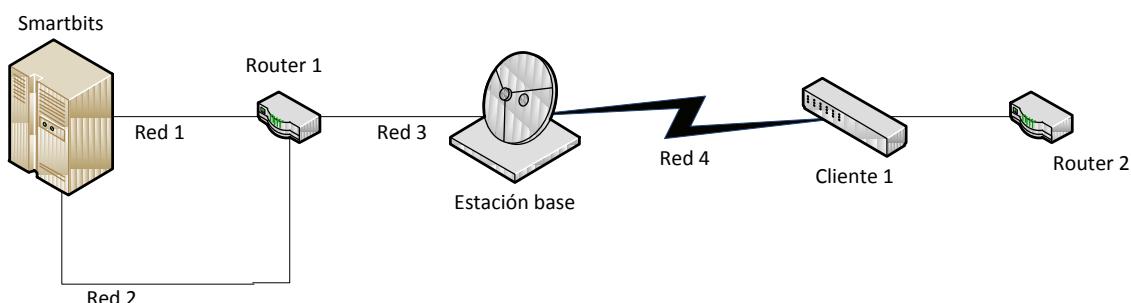
Las dos opciones que tenemos es usar:

- Analizador de redes Smartbits 6000B (perteneciente al ITA) o IN2X (perteneciente a Aragón Telecom).
- La monitorización que proporcionan los propios equipos WiMAX.

Inicialmente se pensó en realizar el análisis de la transmisión con un analizador de redes. Proporciona datos de retardo, pérdida de paquetes, *throughput*... pero dicho sistema sólo permitía la realización de medidas para cortas distancias. Esto es debido a que es necesario cablear emisión y recepción al mismo equipo, donde se encuentran el generador de tráfico y el analizador de dicho tráfico; o la utilización de elementos de sincronización basados en GPS, de los que se carecía.

Existía la posibilidad de realizar las pruebas en el laboratorio, pero dichas pruebas distan mucho de una transmisión real, puesto que es muy complicado simular obstáculos, desvanecimientos o atenuación dentro de una sala. Una posibilidad para esta simulación es conectar estación base y cliente con flanges (guías de onda flexibles) si lo permite el equipo y un atenuador variable interpuesto para simular caídas de la red. En nuestro caso los equipos WiMAX no disponían de esta funcionalidad.

Por tanto, se pensó una solución para usar el analizador de redes en transmisiones de larga distancia y fue enviar el tráfico en un sentido a través de un equipo WiMAX y reenviarlo en sentido opuesto desde el equipo destino hacia el primero, el cual está conectado a través de un *router* al analizador de redes. Como el primer equipo WiMAX es capaz de detectar que su dirección destino es la del analizador de redes, los paquetes que le van llegando son devueltos sin realizar la transmisión. Para hacer el sistema de transmisión transparente y evitar esto, se creó una VPN (*Virtual Private Network*) entre dos PCs, que se configuraron como *routers* Linux y se situaron previo a la transmisión y tras la recepción respectivamente. De esta manera el primer *router* direcciona el tráfico al segundo y este lo retransmite al primero, que se encargaba de enviarlo, esta vez sí, al analizador de redes. Los diferentes sistemas de medida estudiados y los ficheros de configuración de vichas VPN, creadas con el software libre OpenVPN, pueden verse en el anexo I.



**Figura 3.1.1. Configuración para uso del analizador de redes.**

De esta manera tendríamos una configuración válida, pero el encaminamiento y la encriptación de la VPN del primer *router* y la retransmisión del segundo generarían retraso y podrían generar errores en los paquetes que nos producirían un análisis ficticio de la transmisión. Además sólo nos interesa el enlace ascendente y de esta manera obtenemos la monitorización absoluta de ida y vuelta, la cual no es simétrica.

Por estas razones, finalmente se optó por estudiar la monitorización de los propios equipos WiMAX, tanto fijo como móvil, porque nos dan directamente los valores en un sólo sentido y totalmente reales, al no existir equipos intermedios. El sentido que elegimos es el ascendente, del cliente a la estación base, puesto que si colocásemos el cliente fijo para recibir, al ser mucho más directivo que la estación base, no permitiría radio de movimiento para el transmisor.

Otra ventaja de esta configuración es que tenemos la posibilidad de transmitir una secuencia de vídeo que puede ser evaluada de manera subjetiva en la recepción, como se explica en el capítulo siguiente y en el anexo G.

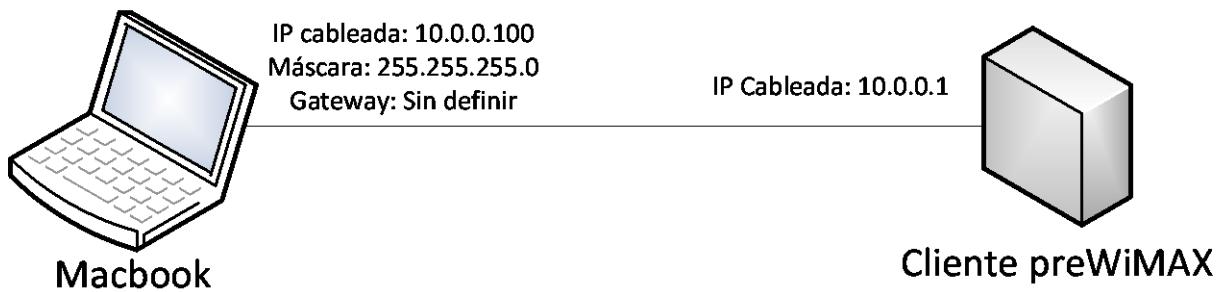
### 3.2.1. *Equipo preWiMAX fijo en banda libre de Alvarion.*

Primero tuve la posibilidad de realizar las pruebas con la pareja de equipos preWiMAX fijo en banda libre BreezeAccess VL de Alvarion, que trabajaba en la banda libre de 5,4

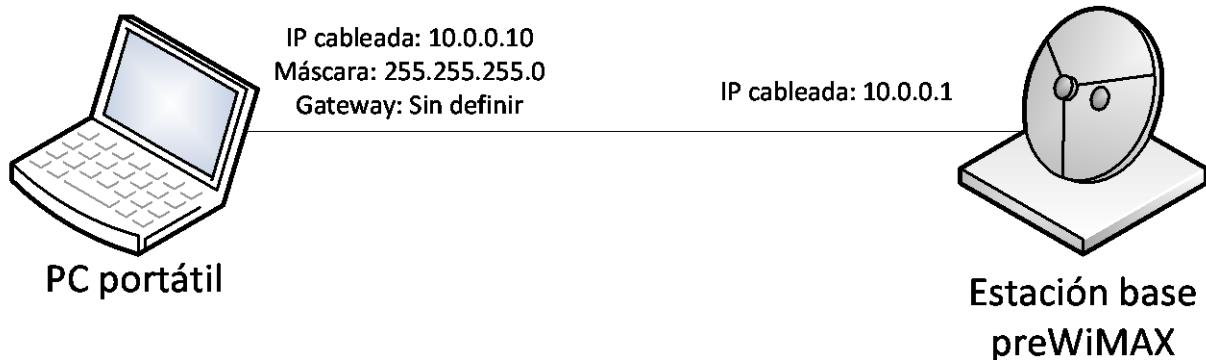
GHz y cuya configuración y opciones se explican en el apartado 1 del anexo E. Se denomina preWiMAX a las tecnologías inalámbricas basadas en OFDM no pertenecientes a otros estándares que fueron apareciendo hasta el primer estándar de WiMAX. Como en toda pareja de equipos de tecnología preWiMAX o WiMAX, la estación base precisa de una antena y tiene un ancho de haz mucho mayor (entre 60 o 90°) que el del cliente (unos 10°), el cual es mucho más directivo y concentra una mayor potencia sin necesidad de usar una antena.

El diseño llevado para esta configuración es el siguiente:

IP inalámbrica: Desactivada



IP inalámbrica: Automática



**Figura 3.2.1. Configuración con los equipos preWiMAX.**

Los pasos llevados para la configuración de la red y las posibilidades de estos equipos están ampliados en el anexo E.

El método llevado para la extracción de los resultados fue una captura simultánea haciendo extensión de escritorio de manera que con el software gratuito Screen Capturer capturaba la monitorización y con una tarjeta capturadora Blackmagicdesign HD la imagen recibida.

Los pasos para la captura de la monitorización son:

- 1- Sólo la primera vez: telnet 10.0.0.1, 3 (administrador) y contraseña “private”, para acceder al programa web SNMP, explicado en el apartado 11 del anexo A.
- 2- Comenzamos a capturar la ventana de DOS con el Screen Capturer.
- 3- En la ventana de DOS entrar a Site Survey – Traffic Statistics – Reset Counters para poner a 0 los contadores antes de cada transmisión.
- 4- Empezar la emisión desde el cliente y esperar hasta que termine.
- 5- En la ventana de DOS entrar a Site Survey – Traffic Statistics – Display Counters para ver las estadísticas de tráfico tras el envío de cada secuencia de vídeo, donde podemos cuantificar las tramas recibidas, descartadas, retransmitidas...
- 6- Parar la captura del Screen Capturer.

Por otra parte, capturamos para los distintos escenarios el ruido del sistema desde: Site Survey - Continuous Noise Floor Display.

La captura de la secuencia de vídeo recibida la realizamos con una tarjeta capturadora Blackmagicdesign HD tal y como se muestra en el apartado 2 del Anexo D.

Una vez configurada la tarjeta, el proceso para capturar cada vídeo recibido fue:

- 1- Sólo la primera vez desde el portátil pulsar en reproducir del VLC [22]. Su modo de empleo se halla explicado en el apartado 1 del anexo D. La ventana del VLC se encuentra en pantalla completa en el escritorio extendido, el cual es capturado por la tarjeta.
- 2- Como ya está configurando y estamos capturando, podemos iniciar la captura HD sin pérdidas pulsando Capture en el Blackmagic Media Express (debe mantenerse la ventana activa o no capturará).
- 3- Paramos la captura una vez finalizada la recepción de vídeo, volviendo a pulsar Capture en el Blackmagic Media Express. El fichero se guarda por defecto en "Mis documentos".
- 4- Finalmente con el software gratuito Avidemux podemos recodificar o recortar la señal. Como no queremos añadir pérdida de señal, sólo recortaremos el fragmento de la captura que nos interese en modo copia de la señal original.

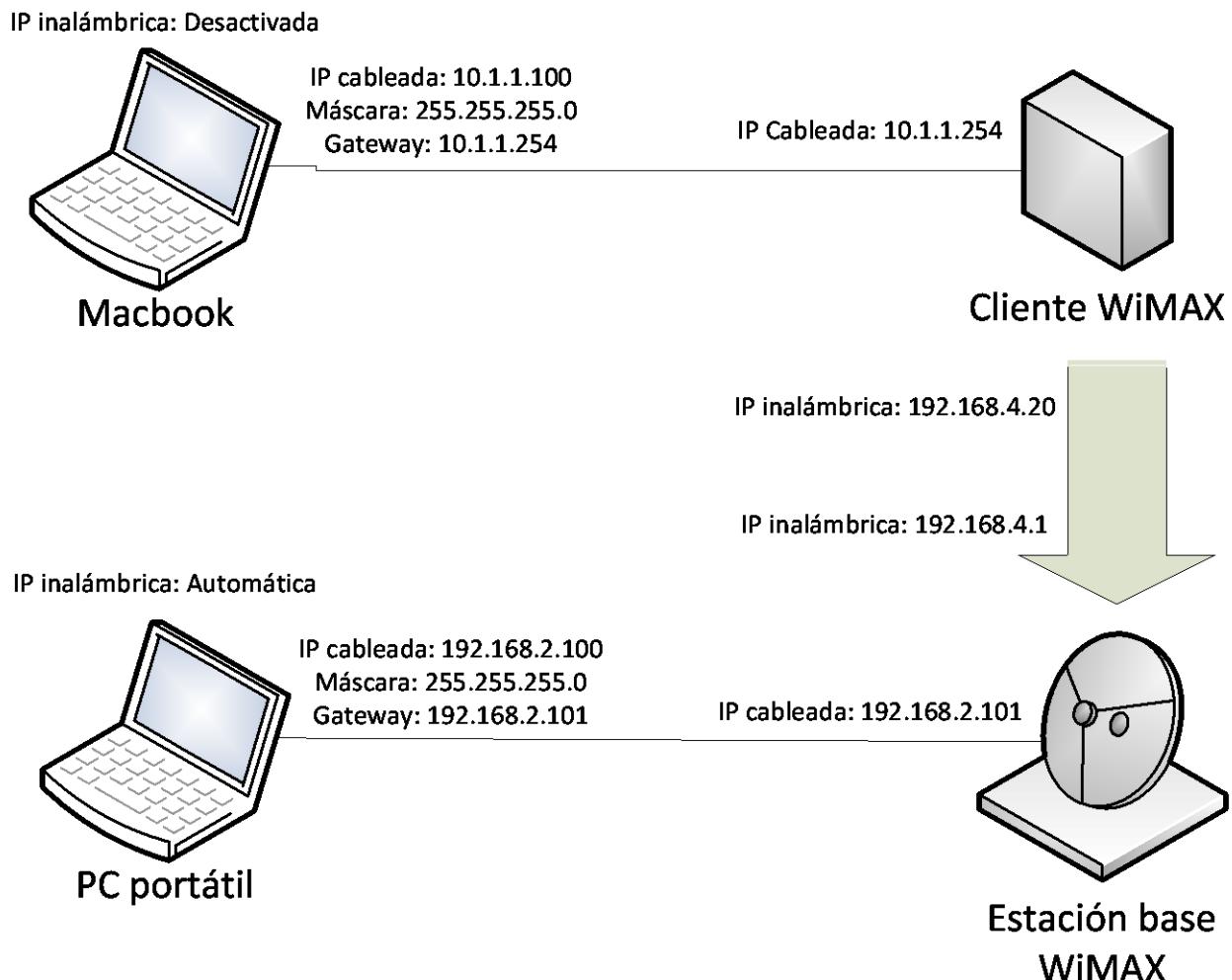
Es importante capturar y parar cada vídeo puesto que el tamaño de las capturas sin comprimir es muy elevado y trabajar con dichos ficheros puede ser muy tedioso.

### *3.2.2. Equipo WiMAX móvil estándar en banda licenciada de Motorola.*

Para tener unas mejores prestaciones, además de la posibilidad de interoperabilidad entre equipos de diferentes marcas, conseguimos que nos prestaran también una estación base y un cliente WiMAX móvil estándar en banda licenciada de 3,5 GHz de Motorola, cuya configuración y opciones se explican en el apartado 2 del anexo E.

Estas pruebas se demoraron por la necesidad de conseguir la licencia para emitir en esta banda. Puesto que los distintos operadores privados de esta banda licenciada cobran una

tasa por su uso, pensamos en el uso de la banda de frecuencias pertenecientes al uso de radares del ejército. Esta solicitud se puede tramitar a través del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en concepto de I + D. También la considero parte de este proyecto y se encuentra adjunta en el Anexo H.



**Figura 3.2.2. Configuración con los equipos WiMAX móvil estándar.**

En este caso, la configuración de los equipos fue más laboriosa, como puede verse en el anexo E.

El método llevado para la extracción de los resultados fue una captura simultánea haciendo extensión de escritorio de manera que con el software gratuito Screen Capturer capturaba la monitorización y con una tarjeta capturadora Blackmagicdesign HD la imagen recibida.

Los pasos para la captura de la monitorización son:

- 1- Sólo la primera vez: telnet 10.0.0.1, 3 (administrador) y contraseña private.
- 2- Comenzamos a capturar la ventana de DOS con el Screen Capturer.

- 3- En la ventana de DOS entrar a Site Survey – Traffic Statistics – Reset Counters para poner a 0 los contadores antes de cada transmisión.
- 4- Empezar la emisión desde el cliente y esperar hasta que termine.
- 5- En la ventana de DOS entrar a Site Survey – Traffic Statistics – Display Counters para ver las estadísticas de tráfico tras el envío de cada secuencia de vídeo, donde podemos cuantificar las tramas recibidas, descartadas, retransmitidas...
- 6- Parar la captura del Screen Capturer.

El proceso para la captura de las secuencias de vídeo recibido es idéntico al apartado anterior.

### 3.3. Elección de los equipos.

La variedad de equipos en el mercado es muy amplia, pero en este proyecto sólo tenemos acceso a los que tienen en propiedad Aragón Telecom, el ITA y los que nos han podido prestar otras empresas, por lo que dependemos de su generosidad y disponibilidad.

#### 3.3.1. Montaje previo al piloto real.

Antes de montar la cadena entera de transmisión de vídeo grabado por una cámara y codificado con codificadores profesionales, realizamos una simulación desde un ordenador portátil a otro. De esta manera, mediante el software gratuito VLC podemos emitir un fichero de vídeo con la codificación y protocolo que deseemos a la dirección destino de otro ordenador al otro lado de la transmisión como si fuera un directo real de la televisión.

Elegimos los protocolos RTP (explicado en el apartado 3 del anexo A [23] [24] [25] [26] [27]) para aproximarnos lo máximo posible al caso real. Es el que usan los codificadores *broadcast* profesionales de televisión, como el Sapec XAVIC, usado en el piloto real y se analizado en el apartado 4.3 del anexo E.

La experiencia nos dice que para conseguir una calidad SD el ancho de banda debe ser de 4 a 5 Mbps para compresión MPEG-2 y de 2 a 3 Mbps para MPEG-4, analizadas en el apartado 1 del anexo A [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35]. Mencionamos únicamente estos dos tipos de compresión por ser los estándares para señales de televisión y, por tanto, los únicos para los que se puede encontrar equipamiento profesional.

Aunque no se ha mencionado todavía, el audio más usado en televisión, y por tanto más fácil de encontrar en equipamiento comercial, es el comprimido con MPEG-1 *Layer II*. Sus características estándar están dadas los siguientes parámetros [36] [37] [38]:

Frecuencias de muestreo: 32, 44,1 y 48 kHz.

Tasas de bits: 32, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 320 y 384 kbps.

Como se puede ver su tasa es prácticamente despreciable respecto al vídeo. Por eso, aunque también iría incluido en el ancho de banda, lo hemos realizado la clasificación de tasas atendiendo a la compresión del vídeo MPEG-2 o MPEG-4. Por último, decir que no el 100% del ancho de banda va destinado a transmisión de datos pura, sino que una porción no superior al 5% va destinada a señales de control, guarda, cabeceras de direccionamiento, comprobación de errores...

Por un lado Aragón TV nos prestó un vídeo de calidad SD (*Standard Definition*, 576i), como la usada en la televisión convencional. Para el estudio de la capacidad de los equipos además elegimos otros vídeos que encontramos en la sección Galería – Vídeos de la página web del software de diseño Bender, donde se pueden descargar diferentes versiones del mismo vídeo en distintas resoluciones, incluido HD. Las características de estas resoluciones están explicadas en el apartado 2 del anexo A.

Una vez descargados los vídeos los recortamos sin modificarlos con el software libre VirtualDubMod 1.5.10.2, VirtualDubMod -MPEG2- 1.6.19 según el caso. Para conservar la codificación inicial seleccionamos la opción “Direct Stream Copy”.

Cuando además de recortar, queremos transcodificar, usamos el software libre Avidemux 2.5, puesto que da más posibilidades que el VirtualDubMod.

Para el caso de necesitar tasas aún superiores a las que nos proporcionan estos vídeos HD, usamos el VirtualDubMod seleccionando *Full Processing Mode*, obteniendo tasas de unos 30 Mbps para formato SD con audio sin compresión PCM y vídeo sin compresión Raw BitmapRGB. Si aún no es suficiente, podemos aumentarla añadiendo un filtro “*resize*” y aplicando resoluciones 1280x720 progresivo con tasas de unos 70Mbps y 1920x1080 progresivo con tasas de unos 150 Mbps.

### 3.3.2. *Montaje del piloto real.*

En este caso no se realiza una simulación por ordenador de la generación, codificación y decodificación del vídeo, sino que, como se puede ver en el apartado 4 del anexo E, se escogió equipamiento para estas tareas.

## 3.4. Elección de los escenarios.

Los escenarios en los que hicimos las pruebas fueron los mismos para los equipos preWiMAX de Alvarion como para los equipos WiMAX móvil estándar de Motorola, salvo alguna prueba de larga distancia que por disponibilidad de equipos sólo pudieron ser realizadas con el WiMAX móvil estándar.

En el apéndice J se adjuntan imágenes de la colocación de las antenas en los distintos escenarios y se aprecia la visión que se tenía desde cada una de ellas.

En cada uno de los escenarios se transmitió a distintas tasas que logramos con distintas codificaciones y vídeos de distinta resolución. Nos hubiese gustado probar también con las distintas modulaciones, pero los equipos realizaban el cambio automáticamente dependiendo de las condiciones.

### 3.4.1. Corta distancia.

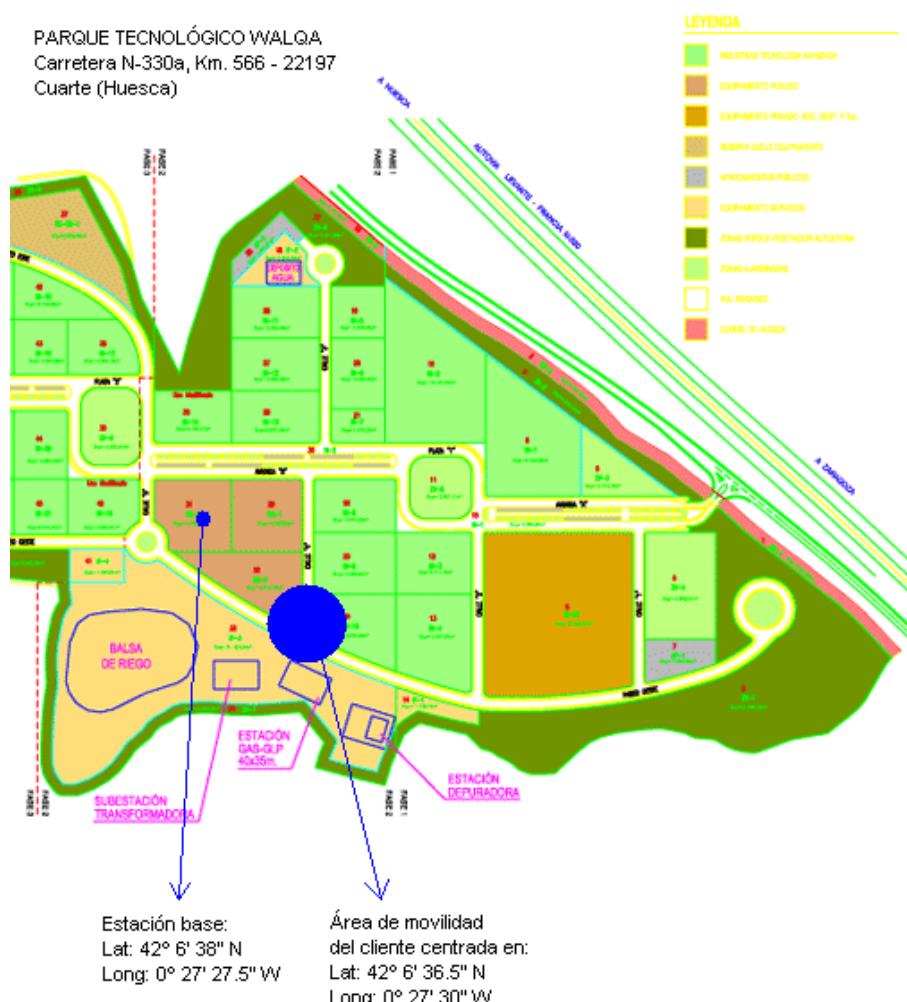


Figura 3.4.1. Escenario de pruebas a corta distancia.

Los escenarios de corta distancia se desarrollan en el área que se muestra en la figura 3.4.1 y varían dependiendo de los obstáculos y hacia dónde apuntemos la antena, como se muestra a continuación:

- 1- **LOS:** Hay línea de vista y la zona de Fresnel está libre de obstáculos.
- 2- **NLOS:** No hay línea de vista y la zona de Fresnel tiene obstáculos. Lo conseguimos apuntando al suelo, al cielo o hacia la estación base con un gran objeto obstaculizando totalmente.

- 3- **Reflexión:** En este mismo escenario giramos el cliente WiMAX para que la transmisión llegue a la estación base con una o varias reflexiones. En primera instancia lo conseguimos rebotando contra el edificio azul que se puede ver en la figura J.1.4. del anexo J. Posteriormente comprobamos como la potencia es suficiente para soportar dos reflexiones contra dos pequeñas casetas.
- 4- **OLOS:** Hay línea de vista pero la zona de Fresnel tiene obstáculos, como podrían ser coches, árboles frondosos cercanos o edificios interfiriendo parcialmente. Nosotros lo simulamos colocando el cliente tras una caseta, de manera que sólo una mitad ve la estación base.
- 5- **Escenario nomádico con LOS:** Movimiento lento (inferior a 15 Km/h) y en un radio de unos 100 m, de manera que no pierda la línea de visión, aunque no sea el lóbulo principal de la antena.
- 6- **Escenario móvil con LOS:** Movimiento más rápido (superior a 20 Km/h) y en un radio de unos 100 m, de manera que no pierda la línea de visión, aunque no sea el lóbulo principal de la antena.
- 7- **Escenario móvil, con LOS, OLOS y NLOS:** Por último, nos movimos alrededor del parque buscando algún otro caso curioso y/o el peor y mejor caso sin cambiar la orientación de la estación base y apuntando de manera aproximada el cliente.

### 3.4.2. Larga distancia.

El parque tecnológico Walqa se encuentra a baja altura respecto a sus alrededores y es difícil conseguir una transmisión a larga distancia. Por otra parte, por imposibilidad de colocarla en la azotea y facilitar su orientación, situamos la estación base en la terraza del primer piso del edificio de la DGA, que se encuentra al final del parque y tiene edificios cercanos, como se ve en la figura 3.4.1.

Para el diseño de estos escenarios se realizó un estudio de los puntos a larga distancia con línea de vista desde Walqa ayudándonos del software SIRENET y de Google Earth.

Para conseguir línea de vista inicialmente pensamos en picos cercanos, como Loarre (LOS), Bolea (OLOS), el Pico del Águila (LOS) o Arguís (LOS), pero todos estaban demasiado lejos para la transmisión, a 29,9 Km, 23 Km, 22 Km y 22 Km respectivamente.

Posteriormente pensamos en emplazamientos de menor altura, pero más cercanos, y descubrimos los siguientes:

Al final de la primera subida de la cuesta de la carretera que va a Zaragoza hay visión LOS. Se encuentra a 5 km y 230° azimut (referenciado al norte).

Pasada esta subida hay una torre de telefonía a unos 6 km y 227° de azimut que tiene una pequeña elevación entre ella y Walqa. Existe línea de vista, pero hay objetos en la zona de Fresnel, OLOS.

Loporzano sería LOS si el emplazamiento de la antena receptora estuviera en la azotea del edificio de Walqa, pero es imposible llegar a la terraza donde la podemos colocar. Está a 12 Km y a 65° de azimut.

Sangarrén es LOS y se encuentra a 10 Km aprox. y 168° de azimut, pero el problema es similar al de Loporzano.

El castillo de Almudévar está a 10 Km, pero es NLOS.

Por último, un pico cercano a Piracés se encuentra a 15,5 Km y es LOS, pero el punto más alto, desde el que se ve Walqa, es de difícil acceso con un turismo.

Una vez realizado el estudio realizamos las pruebas que fueron posibles y que creímos pertinentes:

- 1- **Muy larga distancia y estático con LOS:** Para conseguir la línea de vista hicimos una prueba desde un pico cercano a Loarre, que se encuentra a 1560 m de altura y 29,9 Km de distancia. Respecto a la estación base está situado a 333° de azimut (referenciado al norte) y hace falta orientar la antena a 2° para que la señal llegue al lóbulo principal.
- 2- **Muy larga distancia y estático con OLOS:** Unos 7 Km antes de llegar al emplazamiento anterior, se sitúa la colegiata de Bolea. Conservando la misma orientación en la estación base ahora nos encontramos a unos 660 m de altura y 23 Km de distancia, con línea de vista pero con obstáculos en la zona de Fresnel, puesto que nos encontramos más bajos.
- 3- **Larga distancia, móvil, con LOS, OLOS y NLOS:** Saliendo del parque tecnológico Walqa por la carretera hacia Zaragoza, antes de llegar a Almudévar hay una pequeña elevación de terreno desde la que conseguimos tener visión directa. Comenzando la transmisión antes de salir del parque y apuntando de manera aproximada hacia la estación base, se consigue pasar por los tres tipos de visión: directa, obstaculizada y sin visión en la misma transmisión, observando cómo reacciona ante las distintas transiciones.
- 4- **Larga distancia, estático y LOS:** En la misma carretera del escenario anterior, nos estacionamos en el punto en el que había línea de visión para hacer las pruebas de distancia como en un caso real de un directo de televisión.

# Capítulo 4: Análisis de los resultados.

## 4.1. Introducción.

La evaluación de la calidad de la señal de vídeo recibida ha sido realizada mediante dos opciones: de manera objetiva a partir de los datos de la monitorización y de manera subjetiva como la media de las opiniones de una serie de observadores. Los datos recogidos de la monitorización y las impresiones de los observadores se hayan en el anexo G. Aquí nos centramos en las conclusiones extraídas de ambas medidas.

La calidad a estudiar en este proyecto es SDTV (*Standard Definition Television*), pero también realizamos una serie de pruebas en HD (*High Definition*) para comprobar la capacidad máxima real en los distintos escenarios. [39] [40] [41] [42] [43] [44].

## 4.2. Evaluación objetiva.

La monitorización de la estación base preWiMAX de Alvarion nos proporciona el número de tramas descartadas, retransmitidas, duplicadas, fragmentos erróneos (a partir del CRC, *Cyclic Redundancy Check*) y porcentajes de retransmisión y de errores de recepción (a partir del CRC).

Por su parte, la monitorización de la estación base WiMAX de Motorola nos permite ver los paquetes y bytes enviados y descartados, de los que se puede extraer el porcentaje de descartados del total enviados.

### 4.2.1. En el laboratorio.

Las primeras pruebas de transmisión se realizaron en el laboratorio para tener configurados óptimamente los equipos antes de salir a medir en campo.

En el laboratorio obtenemos los resultados ideales, siempre que nos aseguremos que no estamos saturando, puesto que tenemos visión directa, recepción máxima y estamos más protegidos de interferencias que en el exterior. Esta situación también nos facilita el estudio del funcionamiento de preWiMAX y WiMAX móvil estándar: tiempos y

proceso de sincronización, transmisión... y fue donde acotamos las tasas de transmisión que aceptaban los equipos.

En los equipos preWiMAX obtuvimos buenos resultados para tasas de hasta 2,5 Mbps aproximadamente y en los de WiMAX móvil estándar para tasas de hasta 3,5 Mbps. De esta manera seleccionamos los vídeos, resoluciones y codificaciones adecuadas para las pruebas. Tanto con la antena omnidireccional como sin ella la transmisión falla a tasas inferiores a lo deseado, pero puede solventarse usando una codificación MPEG-4 en lugar de MPEG-2.

En cuanto al ruido, cuando está funcionando la estación base antes de conectar el cliente tenemos un nivel de ruido entre -94 dBm y -93 dBm y un ratio señal a interferencia de entre 15 y 25 dB, siendo la media de unos 22 dB. Una vez conectado el cliente, estos valores pasan a ser aproximadamente -93 dBm de media de nivel de ruido y 27 dB de media de ratio señal-interferencia.

#### *4.2.2. En Walqa.*

Para el preWiMAX nos dimos cuenta en el laboratorio que las codificaciones MPEG-2 no eran suficientes en la mayoría de los casos porque se congelaba la imagen, pero para MPEG-4 fueron incluso mejores de lo esperado. Para distancias de unos 100 m. soportó movimiento, una reflexión e incluso dos reflexiones para vídeos de 480p codificados con MPEG-4 con total robustez. En los vídeos de 720p comenzaban a apreciarse una mayor cantidad de errores, como vemos en el anexo F y para 1080p los resultados de la monitorización no fueron nada buenos, como cabía esperar.

En cuanto a los diferentes escenarios, en LOS y OLOS los resultados fueron muy similares y bastante buenos, excepto con compresión MPEG-2 con la tecnología preWiMAX.

En el escenario NLOS con reflexión aumentaron los errores ligeramente y las tramas duplicadas notablemente.

En el escenario NLOS sin reflexión disminuyeron las tramas duplicadas de nuevo, pero ahora aumentaron los errores y la retransmisión.

Por último, comprobamos cómo el escenario móvil no es soportado por el equipo preWiMAX, ya que aumentan aún más los errores, volvieron a elevarse las tramas duplicadas y la retransmisión.

Por otro lado, el cliente del equipo WiMAX móvil estándar presenta las siguientes medidas aprox. para los escenarios en el laboratorio y en Walqa, a unos 100 m. de radio:

RSSI: -42 dBm. CINR: 32 dB.

Por tanto, un CINR (ratio de la calidad de la portadora respecto al ruido e interferencias) de unos 32 dB equivale a un ratio de potencias de unos  $10^{3,2}$ , lo que significa que la potencia de la portadora es unas 1584,89 veces mayor que la suma de las potencias del ruido e interferencias.

Por su parte, el RSSI es el indicador de la intensidad de la señal recibida. En nuestro caso, muy cercano del ideal (con línea de vista, pocas interferencias y a poca distancia entre antenas), se obtiene una señal de aproximadamente -40dBm RSSI.

La clasificación de la calidad con estos valores la calculamos experimentalmente a la vista de los resultados de paquetes y bytes descartados que recogemos en la monitorización de la estación base y de la visualización en el equipo receptor, de manera que clasificamos:

Un RSSI de -50 dBm o superior como buena calidad de recepción.

Un RSSI de entre -50 dBm y -60 dBm como una calidad de recepción regular.

Un RSSI inferior a -60 dBm como una mala calidad de recepción.

Un CINR mayor de 31 dB como una buena calidad de recepción.

Un CINR entre 30 y 31 dB como una calidad de recepción regular.

Un CINR inferior a 30 dB como una calidad de recepción mala.

De los valores monitorizados en el WiMAX móvil estándar que vemos también en el anexo F, deducimos lo siguiente:

Las transmisiones LOS y OLOS funcionan correctamente con prácticamente todas las resoluciones, SD y HD, y codificación MPEG-4 y con codificaciones MPEG-2 sólo en WiMAX.

El número de paquetes descartados comienza a aumentar ligeramente en codificaciones MPEG-2, calidad SD y escenario NLOS con reflexión y drásticamente para resoluciones HD, tanto con codificación MPEG-2 como MPEG-4.

Para escenarios NLOS sin posible reflexión aparente nos sorprendió cómo a distancias cortas (unos 100 m.) es robusto frente a cambios en la dirección en que orientemos el cliente, sólo aumentando ligeramente el número de paquetes descartados.

Por último, en los escenarios móviles probados nos salimos totalmente de la línea de vista dando una vuelta alrededor de la antena y a una distancia mayor que las anteriores, por lo que se dispara el número de paquetes descartados. Sin embargo vemos que la que afecta en mayor medida a la transmisión es la vuelta de menor radio porque las ondas no tienen camino posible para llegar a través de reflexiones.

### 4.2.3. *Fuera de Walqa.*

Para obtener los resultados de transmisiones a distancias que nos encontraremos en casos reales, salimos fuera de Walqa tal y como se explica en el apartado de escenarios del capítulo anterior.

Primero tomamos una serie de valores desde un emplazamiento de la red REPITA muy cercano al castillo de Loarre. Dicho enlace distaba 30 Km con línea directa de vista, y se obtuvieron los siguientes resultados:

RSSI: -74,5dBm CINR: 29,46dB.

Posteriormente se tomaron otros valores desde una zona alta al lado de la colegiata de Bolea. Este punto se encuentra 6 Km más cerca, pero al ser una altura menor, a pesar de

haber línea directa de vista, existen obstáculos en la zona de Fresnel y, en concreto, en las proximidades de la antena receptora, lo que hace aún más complicada la recepción. Los resultados obtenidos fueron:

RSSI: -77dBm CINR: 28,5dB

En todas las pruebas que se realizaron a menos de 8 Km. de distancia con línea de vista se consiguieron valores de RSSI por encima de -50 dB y de CINR superiores a 30,5 dB. En las peores situaciones sin línea de vista se llegaba a perder la señal, pero en cuanto se pasaba a una mejor situación, aunque siguiera sin haber línea de vista, en la que las ondas pudieran llegar con reflexiones o por difracción, se volvía a recuperar.

La velocidad, superior a 100 Km/h no afectó a la transmisión.

## 4.3. Evaluación subjetiva.

La calidad percibida de vídeo es por definición un concepto subjetivo. Por tanto, la forma más precisa de definirla es mediante la evaluación con personas reales. Por ello nos centramos en el concepto de QoE (Calidad de Experiencia), en el cual se valora la calidad de la transmisión de vídeo desde el punto de vista del usuario final en lugar de centrarnos en el QoS, cuyo punto de vista se centra en las prestaciones de la red, como puede ser la pérdida de paquetes, el retardo o el *jitter*. Existen dos clases de medidas subjetivas: las cualitativas y las cuantitativas [45]. Las cualitativas apuntan a entender los factores sociológicos que determinan la calidad, mientras que las cuantitativas intentan dar una ponderación de la calidad utilizando alguna escala numérica, ya sea por medio de un visionado y una serie de observadores o con un equipo medidor de calidad subjetiva como puede ser el Tektronix PQA500, explicado en el apartado 3 del anexo E. La razón por la que no lo usamos es porque precisa recibir dos flujos SDI y no disponíamos de dos reproductores con dicha salida.

Dado que son más apropiadas para utilizar en conjunto con otros factores en la medida de QoE, nosotros nos centramos en las cuantitativas. Una medición de la QoE puede expresarse a través del valor medio de opinión MOS (*Mean Opinion Score*), el cual es una medida subjetiva que cuantifica el impacto perceptual de varias formas de la degradación del servicio, desde el punto de vista de los usuarios finales.

Hay métodos estándar para realizar evaluación subjetiva de la calidad de un video, como los descritos en la ITU-R BT.500-11 [46] [47] [48]. Entre ellos está el llamado puntuación de calidad absoluta (ACR), incluido en la ITU-T *Recommendation P.910* [49]. De las variantes incluidas en este estándar (estímulo único, doble estímulo...) en este proyecto usamos la denominada de doble estímulo, comparando en iguales condiciones y simultáneamente la señal original y la recibida.

El método usado en este proyecto se basa en la citada ITU-R BT.500-11, aunque también se usan ideas halladas en otros estándares, como el ITU-T P.800 [50], de voz, y el ITU-T P.920 [51], de multimedia interactiva, de donde obtuvimos la idea del test tras el visionado y algunos parámetros sobre los que preguntar en el test.

### 4.3.1. En el laboratorio.

Al igual que comentábamos en el apartado 4.2.1, las pruebas subjetivas en el laboratorio también nos sirven para acotar las limitaciones de nuestros equipos preWiMAX y WiMAX.

En el análisis subjetivo esta información es mayor, puesto que ahora cuantificamos la calidad real de la imagen y sonido que el ser humano aprecia.

También con estos resultados nos damos cuenta de una característica que en la evaluación objetiva no podemos. Como la recepción tarda un ligeramente más en aparecer en iguales condiciones en WiMAX que en preWiMAX, podemos deducir que el búfer del equipo WiMAX es mayor que el del equipo preWiMAX, lo que la hace más robusta, sin llegar a ser un problema para los directos.

### 4.3.2. En Walqa.

Una vez hecho un visionado de una selección de vídeos a un grupo de siete personas, se les realizó un test, cuyos resultados se pueden ver en el apartado 7 del anexo G y aquí se presenta un breve resumen:

	MOS	Desviación típica
<i>MPEG-4 720p LOS preWiMAX</i>	4,857143	0,377964
<i>MPEG-4 720p LOS WiMAX</i>	4,857143	0,377964
<i>MPEG-4 720p OLOS preWiMAX</i>	4,142857	0,690066
<i>MPEG-4 720p OLOS WiMAX</i>	4,714286	0,48795
<i>MPEG-2 576i OLOS preWiMAX</i>	1,714286	0,755929
<i>MPEG-2 576i OLOS WiMAX</i>	3,428571	0,786796
<i>MPEG-2 480p NLOS con reflexión preWiMAX</i>	3,857143	1,069045
<i>MPEG-2 720p NLOS con reflexión WiMAX</i>	1,571429	0,534522
<i>MPEG-2 de alta tasa 720x320 LOS preWiMAX</i>	2,571429	0,786796
<i>MPEG-2 de alta tasa 720x320 LOS WiMAX</i>	2,714286	0,755929
<i>MPEG-4 480p NLOS sin visión preWiMAX</i>	2,857143	0,377964
<i>MPEG-4 480p NLOS sin visión WiMAX</i>	2,571429	0,534522
<i>MPEG-4 720p móvil diferentes escenarios preWiMAX</i>	1,142857	0,377964
<i>MPEG-4 720p móvil diferentes escenarios WiMAX</i>	1,857143	0,690066

Tabla 4.3.1. Resultados subjetivos obtenidos en el visionado.

La media de las evaluaciones de todos los observadores nos proporciona el indicador MOS (*Mean Opinion Score*) de calidad para cada vídeo.

Por otra parte, la desviación típica nos indica cómo de dispar ha sido la evaluación de los observadores. Es la raíz del valor cuadrático medio de las distancias de las puntuaciones a la media de ellas. A pesar de haber elegido varios observadores de perfiles distintos, no es muy elevada, puesto que la percepción es similar para todos, lo cual demuestra una consistencia en las puntuaciones.

El peor de los casos de desviación típica se da para un vídeo transmitido con NLOS en el que se transmite con una reflexión. La desviación típica es aproximadamente 1 debido a que los errores son prácticamente inapreciables, siendo dos de las puntuaciones un 5 y una de ellas desciende hasta el 2. El hecho de que algunos observadores sean más exigentes que otros se atenúa en el MOS final con un número mayor de observadores.

Como veíamos en los resultados objetivos, en los escenarios LOS y OLOS la calidad es muy buena hasta 720p con preWiMAX y hasta 1080p con WiMAX con compresión MPEG-4. En cuanto a la compresión MPEG-2, funcionó con WiMAX hasta 576i y no fue soportada por el equipo preWiMAX. En los resultados subjetivos es más sencillo interpretar los niveles de degradación en el resto casos:

En los escenarios NLOS con reflexión empieza a notarse degradación de la imagen para secuencias de 720p y totalmente inadmisible para secuencias de 1080p.

En el escenario NLOS sin reflexión la imagen se hace casi imperceptible independientemente de la tasa para preWiMAX, pero sigue siendo bastante consistente para WiMAX hasta señales de 720p.

Por último, comprobamos el escenario móvil para distancias cortas con preWiMAX y para cortas y largas con WiMAX. A pesar de que la evaluación subjetiva global es baja, los observadores justificaron que la mayoría del tiempo funcionaba perfectamente. Esto es debido a que cuando nos situamos con el vehículo lejos del haz principal de la antena receptora y sin posibilidad de reflexiones, común cuando la distancia es reducida, la señal recibida decae hasta perderse.

### 4.3.3. *Fuera de Walqa.*

En los escenarios fijos los resultados para vídeos de hasta 720p en distancias inferiores a 8 Km. de distancia con línea de vista fueron similares a los realizados a 100 m. con línea de vista.

En cuanto a escenarios móviles, se aprecian pequeñas imperfecciones, pero la secuencia sólo se congelaba para los peores escenarios NLOS y en ningún momento por la velocidad, a pesar de superar los 100 Km/h. Tras estas pérdidas intermitentes se vuelve a recuperar la secuencia sin perderse la sincronización, lo cual garantiza que haciendo uso del búfer adecuado se puede garantizar una buena conexión ante las situaciones más adversas, siempre y cuando estas no sean muy duraderas.

## 4.4. Conclusión.

Los motivos por los que se pierden paquetes en una transmisión inalámbrica, lo cual provoca que la valoración subjetiva sea inferior, pueden ser errores debidos al canal, interferencias o control de acceso al medio [52].

Como en los escenarios de nuestro proyecto sólo se está transmitiendo un único enlace en nuestra frecuencia, no hay problemas de gestión de colas de transmisión de diferentes usuarios, ni congestión en la red, y pocas interferencias (siempre hay debido a los armónicos de otras frecuencias).

Por tanto, es razonable suponer que las tramas WiMAX perdidas son debidas a errores en el canal: potencia insuficiente tras reflexiones, obstáculos y atenuación en el espacio libre, desvanecimientos de la señal, desbordamiento de buffers, retardo excesivo...

En las evaluaciones subjetivas cuantificamos la calidad real de la imagen y sonido que el ser humano aprecia. Vemos que no siempre lleva una relación directamente proporcional con los valores objetivos, dado que la pérdida de bytes puede ser más dañina en unos casos que en otros. Esto varía principalmente dependiendo de la robustez de la modulación, del sistema de compresión y de qué bytes sean los que se pierden. De igual manera, en la monitorización del equipo WiMAX vemos la diferencia entre bytes y paquetes perdidos. En cuanto al sistema de compresión cabe decir que existe un compromiso entre su tasa de transmisión y robustez, dado que si se dota de un mayor número de *I-frames* (apartado 1 del anexo A), la pérdida de calidad será menor pero precisaremos un mayor ancho de banda para su transmisión.

La modulación usada también incide directamente en el ancho de banda de transmisión. Cuanto menor sea este valor de modulación, mayor número de pérdidas se producen.

En cuanto a las pruebas de distancia podemos concluir que dependen de la potencia del trasmisor, de las antenas elegidas, de la característica del receptor, de las alturas de las antenas, del tipo de modulación y de la tasa de transmisión del enlace.

Por ser WiMAX una tecnología basada en la modulación OFDM, el tiempo de guarda entre portadoras ortogonales OFDM hace que el sistema gane en robustez. Aunque la respuesta no sea totalmente plana, sí lo será para cada portadora orthogonal OFDM por separado, siempre y cuando el tiempo de guarda sea suficientemente alto, pero pierde *throughput*, eficiencia, por el tiempo que se está sin transmitir.

La distorsión que más afecta a OFDM es la multicamino, que produce el conocido como desvanecimiento *Rayleigh*. La antena móvil recibe un gran número de ondas reflejadas y esparcidas. Debido a los efectos de cancelación de ondas, la potencia instantánea recibida por una antena en movimiento se convierte en una variable aleatoria, que depende de la ubicación de la antena. De igual manera, si el directo se realizara en movimiento, el impacto es el mismo, esta vez debido al efecto *Doppler*. La consecuencia directa es una pérdida de ortogonalidad.

El sistema de resolución de errores de WiMAX se encarga de minimizar este efecto negativo sobre la señal en la medida de lo posible, ya que a partir de cierta velocidad,

unos 120 Km/h, la corrección es insuficiente. Por ejemplo, a partir del concepto de diversidad, principio de las antenas MIMO (explicadas en el apartado 10 del anexo A), se atenúan las variaciones *Rayleigh*. Igualmente incluye técnicas de modulación y codificación de canal adaptativas, gestión avanzada del espectro con selección de frecuencias dinámicas inteligente (i-DFS), realimentación del estado de canal (CQI) para ajustar la tasa de codificación y el orden de la modulación, entrelazado, etc.

Además WiMAX en banda de 3,5 GHz licenciada permite una mayor potencia de emisión y, al emitir en una frecuencia menor que el de 5,4 GHz, como la atenuación aumenta con el cuadrado de la frecuencia, la distancia máxima de emisión será mayor.

Es por todo ello que la tecnología WiMAX estándar proporciona mejores prestaciones, permitiendo ser la solución al problema planteado en este proyecto.

# Capítulo 5:

## Conclusión final.

### 5.1. Los resultados.

En cuanto a los resultados del PFC hay que indicar que debido a las limitaciones encontradas son más restrictivos que los valores que se obtendrían en un caso real. Entre dichas limitaciones podemos destacar:

Los equipos de los que dispusimos, como es el caso del preWiMAX de 5,4 GHz, un equipo que para este uso ya se ha quedado obsoleto. Por su parte, la potencia máxima del equipo de WiMAX estándar fue inferior a la deseada. Asimismo, en ambos la configuración no nos permitía dar suficiente peso al canal ascendente.

En todos nuestros escenarios la estación base, antena receptora fija, no se encontraban a más que 2 m. de altura sobre una terraza que no estaba en el punto más alto del edificio y con edificios alrededor. Por tanto, se producían reflexiones inadecuadas, estaba obstruida por unos de sus lados y se obstruía la zona de Fresnel para largas distancias a puntos que no estuvieran mucho más altos que nuestra antena (figura 5.1.1). En la tabla 5.1.1 puede verse cómo afecta la altura de las antenas a una transmisión.

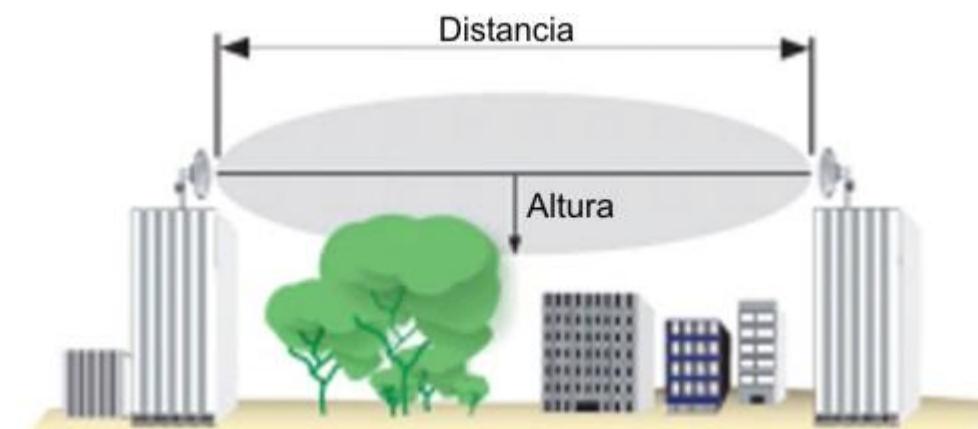


Figura 5.1.1. Representación de la influencia de la altura de las antenas en la comunicación.

Distancia	Altura	Altura	Distancia	Altura	Altura	Distancia	Altura	Altura
	2.4 Ghz	5.8 Ghz		2.4 Ghz	5.8 Ghz		2.4 Ghz	5.8 Ghz
km	m	m	km	m	m	km	m	m
0,5	4	3	6	15	10	17	25	16
1	6	4	7	16	11	18	25	17
1,5	7	5	8	17	11	19	26	17
2	8	6	9	18	12	20	27	18
2,5	9	6	10	19	13	21	27	18
3	10	7	11	20	13	22	28	19
3,5	11	7	12	21	14	23	29	19
4	12	8	13	22	14	24	29	20
4,5	13	8	14	22	15	26	31	20
5	13	9	15	23	15	28	32	21
5,5	14	9	16	24	16	30	33	22

**Tabla 5.1.1. Distancia máxima de las antenas dependiendo únicamente de la frecuencia y altura de las mismas.**

Por otro lado, existen una serie de factores que han hecho que las características ideales de la tecnología que comentábamos en el capítulo 2 y en el anexo B disminuyan, pero que también estarán presentes en el caso real. Cada conector produce una pérdida de 0,2 dB y la estación base está conectada mediante un cable Ethernet de 50 m. Dependiendo del cable utilizado, su atenuación será:

RG-316: 1,5 dB por metro.

LMR-100: 1,277 dB por metro.

LMR-200: 0,522 dB por metro.

dLMR-240: 0,415 dB por metro.

LMR-400: 0,23 dB por metro.

En este grupo de factores también debemos incluir que cada protocolo utiliza entre un 5% y un 20% de la velocidad de conexión para establecer y mantener el propio enlace, por lo que la tasa de transferencia útil será la velocidad de conexión menos este porcentaje, y que las prestaciones de una conexión también se pueden ver afectadas por la hora de su utilización, puesto que el tráfico que existe en un momento dado puede producir más interferencias que en otro momento.

En cuanto al análisis de las medidas, podemos decir que en el caso del método subjetivo hubiera resultado más preciso si el número de observadores hubiese sido mayor.

De cualquier manera, una de las conclusiones de este proyecto es que para un correcto análisis de los resultados no es suficiente una evaluación objetiva ni una subjetiva, sino la información dada por una evaluación conjunta de ambas, como hemos hecho en este proyecto y además en una situación más restrictiva que el caso real.

## 5.2. Solución final.

En este PFC se ha comprobado que la tecnología WiMAX cumple totalmente los requisitos para transmitir señal de televisión, aunque no en todos los casos, como

comentamos a continuación. Es por ello que la solución propuesta para los directos con unidades móviles de Aragón TV es una solución mixta.

Para aquellos directos en los que se encuentren en un escenario rodeado de obstáculos y/o se precise una alta tasa, debida a una alta calidad y secuencias de mucho movimiento de pixeles, seguirá siendo necesario el uso del satélite.

Por otro lado, como los enlaces WiMAX precisan un tiempo para montarse, sólo podrán usarse para directos que se conozcan con al menos un día de antelación, como ocurre en la gran mayoría de los casos. Este tiempo es necesario para que un instalador se dirija al centro de la red REPITA más cercano al directo, que estará comunicado directamente con el control central de Aragón TV por fibra óptica, una red SDH de 2 STM-1 (1,5 Gbps) o PDH (64 Mbps), y una vez allí coloque la estación base a la altura necesaria de la torre y la oriente hacia donde se vaya a colocar el cliente que transmitirá el directo.

En el otro extremo, desde donde se graba y transmite el directo, se encontrará la unidad móvil, que simplemente precisará llegar al lugar del directo unos 15 minutos antes del comienzo para orientar el cliente correctamente a la estación base. Deberá llevar instalado un mástil para facilitar la transmisión y, dependiendo del directo, puede estar cableada hasta la cámara o no. En algunos escenarios no es posible cablear hasta la cámara porque ésta se halla muy alejada o por no poder llegar a ella con un cable, como puede ser una grabación en un piso muy elevado. Para estos casos, junto a la cámara se necesitará una mochila equipada para enlazar con un receptor que se instalaría en la furgoneta. Este enlace podría proporcionar la tecnología WiFi o COFDM, dado que para una distancia corta no es necesaria la inversión que llevaría otro enlace WiMAX, y dotaría a la furgoneta de la libertad de movimiento mayor para obtener línea de visión directa con la estación base. Este montaje también facilita los directos nomádicos o móviles.

En el caso de que el directo tenga que ser inmediato sólo existe una posibilidad, todavía en evolución. Consistiría en una única mochila conectada a la cámara y equipada con la tecnología móvil actual HSPA o HSPA+, donde haya redes disponibles, o la futura tecnología móvil LTE cuando se implante definitivamente. Si el directo no precisa mucho ancho de banda, esta tecnología amplía la cobertura que nos puede proporcionar WiMAX a una cobertura prácticamente total, incluso subsuelo.

Para directos inmediatos se estudió la portabilidad de WiMAX de manera que toda la cadena de transmisión cupiera en una mochila, pero resultó demasiado voluminoso y precisaba una antena omnidireccional para evitar tener que apuntar a la estación base con la que se perdería potencia de transmisión en la dirección del enlace.

Por último cabe destacar que el satélite es el medio idóneo para garantizar que la difusión se desarrolle con eficacia y de manera universal, pero debido a su alto costo se intentará evitar su uso siempre que sea posible.

## 5.3. Líneas futuras.

Con la llegada de LTE o WiMAX 802.16m (anexo B.7), las prestaciones de un enlace de transmisión terrestre serán equiparables a las transmisiones vía satélite, salvo en la posibilidad que da el satélite de para las escasas radiodifusiones internacionales. Además, en el caso de LTE se amplía la cobertura al interior de edificios gracias a las femtoceldas (apartado 8del anexo A) y subsuelo. Con WiMAX seguirá sin poderse transmitir con obstáculos cercanos cubriendo totalmente línea de vista y zona de Fresnel, por lo que LTE será la solución preferible.

Con el incremento del ancho de banda que nos proporcionan estas nuevas tecnologías podremos lograr transmisiones de mayor calidad, HD o incluso 3D, y más robustas, dotando de más *I-frames* a la secuencia comprimida.

En general, durante el año 2011 y siguientes, los operadores y fabricantes continuarán la migración a LTE, pero sin dejar de lado las actuales redes. Además de enfrentarse a cuestiones como la necesidad de disponer de espectro adicional, LTE tiene que luchar por la disponibilidad de terminales. Su mayor mercado, la telefonía móvil se ve limitado a la llegada de *smartphones* con soporte de LTE, que no será una realidad hasta después de 2011.

Por otro lado, una de las posibles líneas de investigación a seguir es la intercomunicación entre el cámara de la unidad móvil y plató sin la necesidad del pinganillo y teléfono móvil que se usan en la actualidad. El canal de retorno es uno de los puntos a favor de WiMAX frente al satélite y no se ha tratado por no ser uno de los objetivos de este proyecto.

Los resultados positivos de este proyecto son el punto de partida para un nuevo uso de la red REPITA que está desarrollando Aragón Telecom y para la investigación en el ámbito de señales de televisión sobre WiMAX por parte del ITA.

# Capítulo 6:

# Bibliografía y referencias.

- [1] J. Pérez Romero, O. Sallent, R. Agustí, M. A. Díaz-Guerra, “Radio Resource Management Strategies in UMTS”. Ed. Wiley, 2005.
- [2] H. Holma, A. Toskala, “WCDMA for UMTS –HSPA Evolution and LTE”. Cuarta edición. Ed. Wiley, 2007.
- [3] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, P. Beming, “3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband”. Segunda edición. Ed. Academic Press - Elsevier, 2008.
- [4] J. P. Castro, “The UMTS Network and Radio Access Technology: Air Interface Techniques for Future Mobile Systems”. Ed. Wiley, 2001.
- [5] Quobis, [http://www.umtsforum.net/pdf/wimax\\_quobis.pdf](http://www.umtsforum.net/pdf/wimax_quobis.pdf).
- [6] IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.).
- [7] ETSI (European Telecommunications Standards Institute).
- [8] FCC (Federal Communications Commission).
- [9] WiMAX Forum, <http://www.wimaxforum.org>.
- [10] Subtel, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones del Gobierno de Chile.
- [11] Blog de Albentia, <http://blog.albentia.com/2009/07/31/wimax-movil/>.
- [12] J. G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, “Fundamentals of WiMAX: understanding broadband wireless networking”. Ed. Prentice-Hall, 2007.
- [13] L. Nuaymi, “WiMAX Technology for Broadband Wireless Access”. Ed. Wiley, 2007.
- [14] K. C. Chen, J. R. B. de Marca, “Mobile WiMAX”. Ed. Wiley, 2008.
- [15] M. D. Katz, F. H. P. Fitzek (editores), “WiMAX Evolution: Emerging Technologies and Applications”. Ed. Wiley, 2009.
- [16] A. Valdovinos Bardají, apuntes de la asignatura “Redes de acceso celular” de la Universidad de Zaragoza.
- [17] WiMAX IEEE, <http://standards.ieee.org/getieee802/802.16.html>.

[18] Wikipedia, <http://es.wikipedia.org>.

[19] J. M. Hernando Rábanos, “Transmisión por radio”. Editorial universitaria Ramón Areces.

[20] <http://www.monografías.com>.

[21] Mobile-FI IEEE 802.20, <http://grouper.ieee.org/groups/802/20/>.

[22] VideoLAN, VLC Media Player, <http://www.videolan.org>.

[23] H. Schulzrinne, “RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications”. Columbia University.

[24] R. Zurawski, “RTP, RTCP and RTSP protocols. The industrial information technology handbook”. CRC Press, 2004.

[25] “Network Protocols Handbook”. Javvin Technologies, 2005.

[26] S. Mack., “Streaming Media Bible”. Ed. Wiley, 2002.

[27] D. Austerberry. “La tecnología streaming de vídeo y audio”. Andoain, 2005.

[28] MPEG (Moving Picture Expert Group), <http://www.mpeg.org>.

[29] J. Gibson, T. Berger, “Digital compression for multimedia. Principles and Standards”. Morgan Kaufmann, 1998.

[30] R. Hill, “A first course in coding theory”. Oxford, 1986.

[31] ISO 13818-1, 13818-2, 13818-3. Coding of moving pictures and associated audio.

[32] A. Netravall, B. Haskell, “Digital Pictures. Representation, compression and standards”. Ed. Plenum Press, 1995.

[33] K. R. Rao, J. J. Hwang, “Techniques and Standards for image, video and audio coding”. Prentice Hall, 1996.

[34] S. J. Solari, “Digital video and audio compression”. McGraw-Hill, 1997.

[35] S. Umbaugh, “Computer Vision and Image Processing”. Prentice Hall, 1998.

[36] ISO 11172-1, 11172-2, 11172-3. Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media up to about 1.5 Mbps. (MPEG-1 video, audio, system). ISO/IEC.

[37] Da. Y. Pan, “Digital Audio Compression”. Digital Technical Journal, Vol. 5, No. 2, 1993.

[38] P. Noll, “MPEG Digital Audio Coding Standards”. CRC Press, 2000.

[39] A. Abramson, “The story of television: 1880 to 1941”. Ed. McFarland.

[40] H. Benoit, “Televisión digital”. Paraninfo, 1998.

[41] W. Bruch, “The PAL colour TV system basic principles of modulation and demodulation”. NTZ Communications Journal 3, págs. 255-268, 1964.

[42] K. J. Jackson, G. B. Townsend, “Television and video engineer’s reference book”. Butterworth-Heinemann, 1991.

[43] I. Sinclair, “Birth of the box: the story of television”. Sigma Press, 1995.

[44] L. Torres, J. R. Casas, E. Lleida, “Sistemas analógicos y digitales de televisión”. Colección Politex, Ed. UPC.

[45] D. Ruiu, “Testing digital video”. Hewlett-Packard, 1997.

[46] ITU (International Telecommunications Union).

[47] ITU-R SG1, Task Group 1-8.

[48] ITU-R Recomendación BT.500-11, “Metodología del análisis subjetivo de imagen de televisión”. 2002.

[49] ITU-T Recommendation P.910, “Subjective video quality assessment methods for multimedia applications”. 2000.

[50] ITU-T Recommendation P.800, “Methods for Subjective Determination of Transmission Quality”. 1996.

[51] ITU-T Recommendation P.920, “Interactive test methods for audiovisual communications”. 2000.

[52] F. Ramos Pascual, “Fenómenos de propagación a frecuencias de microondas y de ondas milimétricas. Revista Gigatrónica, num. 8.

