

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**COMUNICACIONES DE BANDA  
ANCHA Y TELEVISIÓN DIGITAL  
BASADAS EN HAPS**

**JESÚS SESMA APARICIO**  
**Julio 2008**

# **COMUNICACIONES** **DE BANDA ANCHA Y** **TELEVISIÓN** **DIGITAL BASADAS** **EN HAPS**

**AUTOR: Jesús Sesma Aparicio**

**TUTOR: D. Bazil Taha Ahmed**

**Grupo de Sistemas de Radiocomunicaciones y Comunicaciones Ópticas**

**Dpto. de Ingeniería Informática**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Julio 2008**

## **“PROYECTO FIN DE CARRERA”**

**Título:** “Comunicaciones de banda ancha y televisión digital basadas en HAPs”.

**Autor:** Jesús Sesma Aparicio.

**Tutor:** D. Bazil Taha Ahmed.

### **Componentes del tribunal:**

**Presidente:** D. Antonio Aguilar Morales

**Vocal:** D. José María Martínez Sánchez

**Vocal secretario:** D. Bazil Taha Ahmed.

**Presidente suplente:** José Luís Masa Campos

**Vocal suplente:** Luís Hernández Arribas

**Fecha de lectura y defensa:**

**Calificación obtenida:**

### ***Agradecimientos:***

En primer lugar me gustaría agradecer a Bazil Taha Ahmed por su gran dedicación durante estos últimos meses. Sobretudo, destacar su empatía y empeño para lograr la máxima calidad en su labor.

Por otra parte, el conjunto del profesorado son los artífices del logro final de este proyecto y por lo tanto se merecen mi más sentido agradecimiento.

Por último me gustaría hacer una mención especial a mi familia y amigos, los cuales han sido el impulso primordial para realizar y conseguir cerrar este ciclo universitario. Mis padres Bernardo y Teresa, mi hermano Bernardo y amigos como Beatriz, David y Jorge(s) quiero que sientan mi satisfacción por todos estos años geniales e inolvidables.

***RESUMEN:***

El objetivo de este proyecto consiste en la realización de un estudio sobre la viabilidad de implementar un sistema HAP para la difusión de servicios de telecomunicación. Para ello se procede al análisis tanto de índole técnica de propagación de la señal como desde el punto de vista de aplicación de un proyecto comercial. Los servicios que han sido desarrollados para este sistema son la difusión de televisión digital y el acceso a red de banda ancha aunque otros posibles servicios digitales podrían ser ofrecidos. A lo largo del proyecto se demuestra la viabilidad de los sistemas HAPs como una solución alternativa de banda ancha a las redes terrestres y satélite. Además como se ha mencionado anteriormente, se despliega un estudio de la tecnología desde el punto de vista de un proyecto de posible aplicación. Para ello se introducirá en un marco de negocio y se tratará de analizar su situación dentro del mercado comercial tanto actual como futuro.

***ABSTRACT***

The goal of this project is the study of the feasibility of a HAP system as a way to offer telecommunication services. This study will be show as two different ways. One will be the study of signal propagation, while the other one will be the application as a business project. In relation with signal propagation both digital television broadcast and broadband wireless access by WiMAX will form the main part of this study. Along the content of the project it will be proved that HAP system can be an alternative solution for terrestrial and satellite systems. Also, HAP technology will be studied as a business project to be applied in the real business market.

## ***LISTADO DE PALABRAS CLAVE***

- 802.11
- 802.16
- Antenas y ganancias
- AAS: Adaptative Antennas System
- Banda ancha
- BWA: Broadband Wireless Access
- DVB-S: Difusión de Vídeo Digital Satélite
- DVB-T: Difusión de Vídeo Digital Terrestre
- ETSI: Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones
- FWA: Fixed Wireless Access
- HAP: Plataforma de gran altitud
- HAVE: High Altitude Very long Endurance
- HiperMAN
- IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
- INR: Relación interferencia a ruido
- LAN: Redes de Área Local
- LOS: Escenario de visión directa
- MAN: Redes de Área Metropolitana
- MIMO: Multiple Input Multiple Output
- Modulación (IQ)
- NLOS: Escenario de visión no directa
- OFDM: Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
- OFDMA: Acceso múltiple por División de Frecuencia Ortogonal
- PLC: Líneas de Comunicación por la líneas de Corriente
- PSK: Modulación de Fase
- QAM: Modulación de Amplitud en cuadratura
- Red de acceso
- Shadowing: Margen por sombra
- SINR: Relación señal a interferencia y ruido
- SNR: Relación señal a ruido

- SOFDMA: Escalable OFDMA
- TDT: Televisión Digital Terrestre
- Uplink y Downlink: Enlaces ascendente y descendente
- WiBro: Banda Ancha Inalámbrica
- WiFi Alliance: Consorcio WiFi
- WiFi: Wireless Fidelity
- WiMAX: World Wide Interoperability for Microwave Access
- WiMAX Forum: Consorcio WiMAX
- Wireless: Inalámbrico
- xDSL: Líneas Digital de suscripción

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1. Introducción general.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2. Estado del Arte.....</b>	<b>19</b>
<b>1.3. Motivación y objetivos.....</b>	<b>22</b>
<b>2. CAPÍTULO 2: DVB MEDIANTE HAPs.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1. Introducción a los servicios.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2. DVB sobre HAPs.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3. Televisión digital.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4. Características técnicas del sistema.....</b>	<b>39</b>
<b>2.5. Parámetros de teoría de la señal y propagación.....</b>	<b>42</b>
<b>2.6. Simulaciones.....</b>	<b>51</b>
<b>2.6.1. SNR vs Potencia de transmisión.....</b>	<b>51</b>
<b>2.6.2. SNR vs Estabilidad del HAP.....</b>	<b>56</b>
<b>2.6.3. SNR con Shadowing.....</b>	<b>61</b>
<b>2.6.4. Enlace ascendente.....</b>	<b>66</b>
<b>2.7. Análisis de las simulaciones.....</b>	<b>68</b>
<b>2.8. Conclusiones.....</b>	<b>69</b>
<b>3. CAPÍTULO 3: WiMAX DESDE HAPs.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1. Historia de WiMAX.....</b>	<b>72</b>
<b>3.2. Introducción.....</b>	<b>74</b>
<b>3.3. Aplicación de WiMAX sobre HAPs.....</b>	<b>79</b>
<b>3.4. Parámetros de teoría de la señal y propagación.....</b>	<b>81</b>
<b>3.5. Enclave frecuencial.....</b>	<b>92</b>
<b>3.6. Simulaciones.....</b>	<b>94</b>
<b>3.6.1. Análisis WiMAX a 3.5 GHz.....</b>	<b>95</b>
<b>3.6.2. Análisis WiMAX a 5 GHz.....</b>	<b>103</b>
<b>3.6.3. Análisis WiMAX a 28 GHz.....</b>	<b>108</b>
<b>3.6.4. Análisis WiMAX a 50 GHz.....</b>	<b>116</b>
<b>3.7. Análisis de la simulaciones.....</b>	<b>118</b>
<b>3.8. Convivencia WiMAX terrestre y WiMAX mediante HAPs.....</b>	<b>119</b>

3.9. Conclusiones.....	125
4. CAPÍTULO 4: INGENIERÍA Y ELEMENTOS CLAVE.....	127
4.1. Amplificadores de potencia.....	128
4.2. Antenas.....	130
4.3. Marcos de implantación.....	134
4.4. Tipos de plataformas.....	139
5. CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	143
Apéndice A: Análisis económico del proyecto.....	145
Apéndice B: Normativa.....	155
Apéndice C: Código Matlab utilizado.....	165
Presupuesto .....	183
Pliego de condiciones.....	185
Hojas técnicas.....	189
Referencias.....	195

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores numéricos de OFDM para 8k, 4k y 2k.....	38
Tabla 2: Características del diagrama de bloques del transmisor HAP.....	45
Tabla 3: SNR necesaria en función de tiempo de guarda, modelado de canal y modulación para una BER= $2 \times 10^{-4}$ y tras decodificador de Viterbi y Reed-Solomon.....	48
Tabla 4: Datos del balance general del sistema.....	52
Tabla 5: Características de los distintos protocolos WiMAX.....	73
Tabla 6: Características para un sistema OFDMA de 2k.....	76
Tabla 7: Tabla comparativa de tecnologías inalámbricas.....	78
Tabla 8: Valores de $k$ y $\alpha$ en función de la frecuencia y la polarización.....	83
Tabla 9: Tasas de intensidad de lluvia para las zonas K y H.....	84
Tabla 10: SNR mínimas necesarias para las distintas modulaciones y tasas de codificación.....	90
Tabla 11: Bandas de frecuencia disponibles inferiores a 10 GHz.....	93
Tabla 12: Valores característicos de los sistemas WiMAX por HAP y terrestres.....	120
Tabla 13: Constantes del tipo de terreno para WiMAX terrestre.....	122
Tabla 14: Potencia de salida de amplificadores en función de la frecuencia.....	129
Tabla A.1: Características demográficas en función del área.....	148
Tabla A.2: Servicios de Internet otorgables.....	149
Tabla A.3: Resumen de parámetros geográficos.....	152
Tabla A.4: Principales costes de la red HAP.....	153

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación básica de un sistema HAP.....	18
Figura 2: Esquema básico de un sistema HAP y sus enlaces.....	19
Figura 3: Comunicaciones HAPs y usuarios.....	20
Figura 4: Comparativa de diagrama de bloques de un sistema DVB-T y DVB-S.....	30
Figura 5: Diagrama de bloques simulado de un sistema DVB-T.....	31
Figura 6: Varias sinc ortogonales que forman OFDM.....	32
Figura 7: Espectro del sistema OFDM.....	33
Figura 8: Ejemplo de una modulación 64-QAM.....	34
Figura 9: Modulador y demodulador de un sistema OFDM mediante DFT.....	35
Figura 10: Tiempos globales y de guarda del sistema OFDMA.....	37
Figura 11: Arquitectura general y enlaces de un sistema HAP.....	39
Figura 12.- Ganancia de la antena X-inverted.....	41
Figura 13.- Diagrama de bloques del sistema repetidor TDT del HAP.....	45
Figura 14.- Diagrama de bloques del receptor.....	46
Figura 15: SNR para potencia de transmisión de 2.5; 5; 10 y 20 W.....	53
Figura 16: Velocidad del viento en función de la altura.....	57
Figura 17: Situación y posibles movimientos de la plataforma aérea.....	58
Figura 18: SNRs con potencias de transmisión de 2,5; 5; 10 y 20 Vatios y altura de 20 y 23 km...	60
Figura 19: SNRs para potencias de transmisión de 2,5 5 10 y 20 W, con margen por sombras.....	64
Figura 20: Comparativa de las diferentes SNRs para potencias de transmisión de 10 y 20 Vatios con márgenes por sombra para las alturas de 20 y 23 kilómetros.....	65
Figura 21: Potencia recibida en función de la transmitida (enlace ascendente).....	67
Figura 22: Mapa de Madrid y Área de cobertura del mapa para potencia de transmisión 20 Vatios con márgenes por sombra.....	70
Figura 23: Diagrama de bloques de un modulador WiMAX.....	77
Figura 24: Espectro de una modulación OFDM.....	78
Figura 25.- Mapa de las zonas hidrometeorológicas.....	84
Figura 26: Atenuación específica en función de frecuencia y tasa de precipitación.....	85
Figura 27: Atenuación específica de la niebla en función de la temperatura y la frecuencia.....	88
Figura 28: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+6).....	96
Figura 29: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+8).....	97
Figura 30: SNR recibida en función de las potencias de transmisión y altura (conf 1+6).....	99
Figura 31: SNR recibida en función de las potencias de transmisión y altura (conf 1+8).....	100
Figura 32: SNR con Msombra en función de las potencias de transmisión (conf1+6).....	101
Figura 32: SNR con Msombra en función de las potencias de transmisión (conf1+6).....	102

Figura 34: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+8).....	105
Figura 35: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+12).....	106
Figura 36: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+12).....	109
Figura 37: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+6+12).....	110
Figura 38: SNR recibida en función de las potencias de transmisión y altura (conf. 1+12).....	111
Figura 39: SNR en función de las potencias de transmisión y altura (conf. 1+6+12).....	112
Figura 40: SNR con Msombra en función de las potencias de transmisión (conf. 1+12).....	113
Figura 41: SNR con Msombra en función de las potencias de transmisión (conf. 1+6+12).....	114
Figura 42: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+6+12).....	117
Figura 43: Sistema WiMAX mediante HAP y medio terrestre.....	119
Figura 44: Posibles casos de interferencia entre HAP y estaciones terrestres.....	123
Figura 45: Diagrama de bloques de un transmisor básico.....	127
Figura 46: Amplificadores de potencia para la banda de 28 GHz.....	129
Figura 47: Amplificador para banda de frecuencia de 50 GHz.....	130
Figura 48: Antena parabólica convencional.....	131
Figura 49: Representación y diagrama de radiación de una antena bocina.....	131
Figura 50: Antenas a 28 GHz con una ganancia de 31 dB.....	132
Figura 51: Futuras antenas a 48 GHz con varios haces.....	133
Figura 52: Estación base terrenal para la conexión de HAPs y red de fibra óptica.....	133
Figura 53: Programa Coreano KARI.....	135
Figura 54: Programa Japonés NICT.....	135
Figura 55: Estructura del proyecto HeliNet y el HeliPlat.....	136
Figura 56: Modelo de implantación de una red mediante HAPs.....	137
Figura 57: Pruebas de un globo estratosférico en Suecia.....	137
Figura 58: Avión tripulado M55 Geophysika.....	140
Figura 59: Avión no tripulado basado en hidrógeno (Global Observer).....	140
Figura 60: Plataforma no tripulado basado en energía solar.....	140
Figura 61: Avión no tripulado basado en energía solar (NASA Pathfinder).....	141
Figura A.1 Arquitectura WiMAX convencional.....	147
Figura A.2: Penetración del sistema en función del entorno.....	150

## ***ÍNDICE DE ECUACIONES***

Ecuación. 1: Pérdidas por espacio libre.....	43
Ecuación. 2: Factor de ruido de una cadena de cuadripolos.....	46
Ecuación. 3: Potencia de ruido de un sistema receptor.....	47
Ecuación. 4: Sensibilidad del receptor.....	47
Ecuación. 5: Ecuación de balance general.....	49
Ecuación. 6: Pérdidas por sombra.....	51
Ecuación. 7: Ganancia de las antenas WiMAX.....	80
Ecuación. 8: Atenuación por lluvia específica del medio.....	83
Ecuación. 9: Pérdidas por lluvia y cálculo de distancias .....	84
Ecuación. 10: Atenuación por niebla específica del medio .....	86
Ecuación. 11: Ecuación de balance general (WiMAX).....	90
Ecuación. 12: Pérdidas del sistema WiMAX terrestre.....	121
Ecuación. 13: Ecuaciones de señal e interferencia del sistema HAP en los sistemas WiMAX terrestres.....	123
Ecuación. 14: Ecuaciones de señal e interferencia del sistema WiMAX terrestre en el sistema mediante HAPs.....	124

## **GLOSARIO**

- **Backhaul:** Es una conexión de baja, media o alta velocidad que conecta a equipos de telecomunicaciones con el objetivo de crear un enlace de transporte de información. Los backhaul sirven normalmente para conectar distintas redes de datos y telefonía por lo que son un bloque muy importante de las mismas.
- **BER (Bite Error Rate):** Es el número de bits erróneos que se han recibido en función del número de bits enviados durante un intervalo de tiempo.
- **Brecha digital:** Expresión en referencia a la diferencia de avance tecnológico entre distintos lugares.
- **dBi (Decibel isotrópico):** Unidad para medir la ganancia de una antena no isotrópica en función de una de ellas. No considera las pérdidas de potencia introducidas por la misma.
- **ETSI (Instituto de Estándares Europeo de Telecomunicación):** Es una organización que produce estándares para la industria de telecomunicaciones en Europa con gran repercusión mundial.
- **FWA (Fixed Wireless Access):** Comunicaciones inalámbricas mediante receptores fijos. El objetivo es utilizar antenas de altas ganancias por su tamaño y directividad a costa de libertad de movimiento (usuarios móviles).
- **IEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos):** Es una asociación formada por ingenieros y científicos que exponen nuevas tecnologías y realizan estándares sin ánimo de lucro.
- **OFDMA (Orthogonal Frequency Domain Multiplexing Access):** Método de acceso por división de frecuencia.

- **UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones):** Organismo de las naciones unidas encargado de regular las normas internacionales en el terreno de las telecomunicaciones.
- **WiBro:** Tecnología de banda ancha desplegada en Corea, donde se despliegan servicios similares a WiMAX.

# **1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

---

## ***1.1 Introducción general***

Desde hace más de una década todas las redes de telecomunicación han tendido hacia la integración de toda clase de servicios en una única red global de telecomunicaciones. Dicha red debe de ser capaz de gestionar todo tipo de información (voz, vídeo, datos...). No obstante, en el pasado, cada red de telecomunicaciones (red de datos, red de telefonía móvil o tradicional) estaba claramente diferenciada, lo que permitía un control individualizado y relativamente sencillo de las mismas. Debido a este cambio conceptual, la complejidad del sistema ha ido siendo mayor con el paso del tiempo.

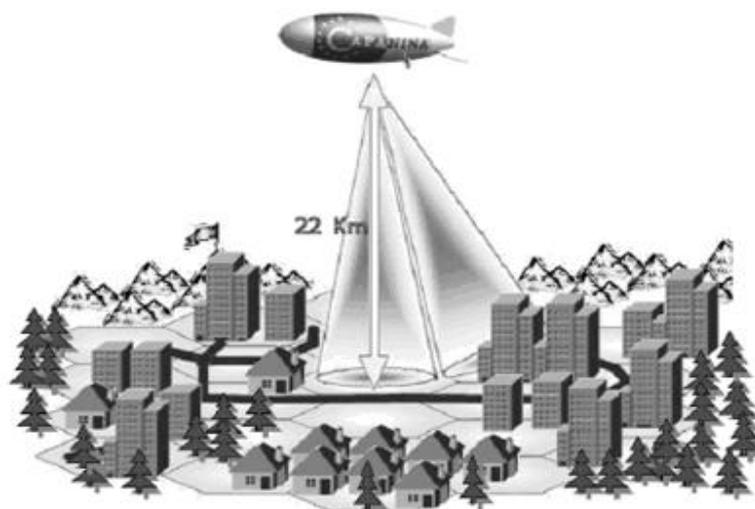
Simultáneamente, los sucesivos avances tecnológicos han ido otorgando una mayor capacidad y robustez en el núcleo de la red. Tecnologías como la fibra óptica, han sustituido al par de cobre en la mayoría de los enlaces entre las grandes centrales de conmutación, creando una red de transporte muy eficiente y potente. Sin embargo, la dificultad y alto coste de sustitución en los accesos finales hacia el usuario, han provocado un desequilibrio entre ambas redes (acceso y transporte). Estas conexiones permanecen en su mayoría con el antiguo par de cobre destinado inicialmente al tráfico de voz. A pesar de esta dificultad, en la actualidad, las redes han ido evolucionando gracias a nuevas modulaciones, con el objetivo de adaptarse a la red única digital. A pesar de dicha evolución, el par de cobre que se instaló hace varias décadas tiene unas limitaciones físicas muy importantes; el espectro se encuentra totalmente explotado, llegando a los límites físicos del medio.

Por otra parte, los altos costes de despliegue que suponen la implantación de otras tecnologías de acceso a cada uno de los usuarios (fibra óptica hasta al hogar y derivados, PLC), no han supuesto un claro avance respecto a la tecnología xDSL. Otros medios como por ejemplo, los sistemas por satélite, no han llegado a ser competitivos en el mercado por sus altos costes y retardos, quedando relegados principalmente al servicio de televisión digital.

Además de las desventajas ya mencionadas, observando la red de acceso desde un punto de vista estructural, salta a la vista su rigidez y poca accesibilidad. En el caso hipotético de un gran desastre natural o guerra que dañase seriamente las conexiones de acceso, el sistema tardaría en recuperarse una cantidad de tiempo importante.

Por otra parte y en un importante lugar cabe destacar la baja disponibilidad de los sistemas de banda ancha convencionales en lugares apartados de los núcleos urbanos. Esto supone además de un impedimento para la disminución de la brecha digital entre zonas geográficas, la subestimación de un mercado menos potente pero globalmente muy importante. En este sentido, la capacidad de implantar tecnologías de bajo coste de despliegue y grandes zonas de cobertura supondrían una solución para ambos retos.

Ante este panorama de limitaciones en las redes de acceso nacen las comunicaciones de banda ancha mediante HAPs. Con el acrónimo HAPS la UIT-R denomina a las estaciones radioeléctricas que pueden embarcarse en globos, aviones estratosféricos o planeadores, que pueden volar hasta 25 Km de altura sobre la superficie terrestre. Dicho sistema permite comunicaciones LOS o casi LOS con grandes regiones de cobertura y solamente una estación transmisora tal y como se muestra en la Figura 1. En este sentido, se combina las amplias zonas de cobertura y capacidad de los accesos por satélites, mejorando prestaciones de retardo y lo más importante, los costes repercutidos. Dichas estaciones cumplen funciones idénticas a las que hoy pueden realizar los satélites de órbita baja (LEO) pero con un coste mucho menor en el despliegue de la red.



**Figura 1: Representación básica de un sistema HAP.**

## 1.2 Estado del arte

Los sistemas HAPs son una tecnología con un gran potencial de implantación en un futuro no muy lejano. En este sentido cada año que transcurre se ofrecen progresos que aientan una mayor expectativa de próxima implantación. Actualmente los principales retos a los que se enfrentan los HAPs son los altos costes y viabilidad constructiva de las plataformas aéreas. Es imprescindible por lo tanto, destacar que a lo largo de este proyecto se expondrá los diversos factores de ingeniería de telecomunicación que afectan al sistema. Por ello, el proyecto global debería tener en cuenta otros bloques de diversas áreas de la ingeniería como la aeronáutica. Dicho sector, evoluciona de una forma constante pero no tan rápidamente como las telecomunicaciones debido a sus altos costes y los riesgos de inversiones en esta área.

Dentro del marco de las telecomunicaciones el sistema HAP supone tal y como se mencionó anteriormente una opción muy eficiente en el diseño de redes de gran ancho de banda. El siguiente esquema (Figura 2) muestra la arquitectura troncal de un sistema HAP y sus principales enlaces:

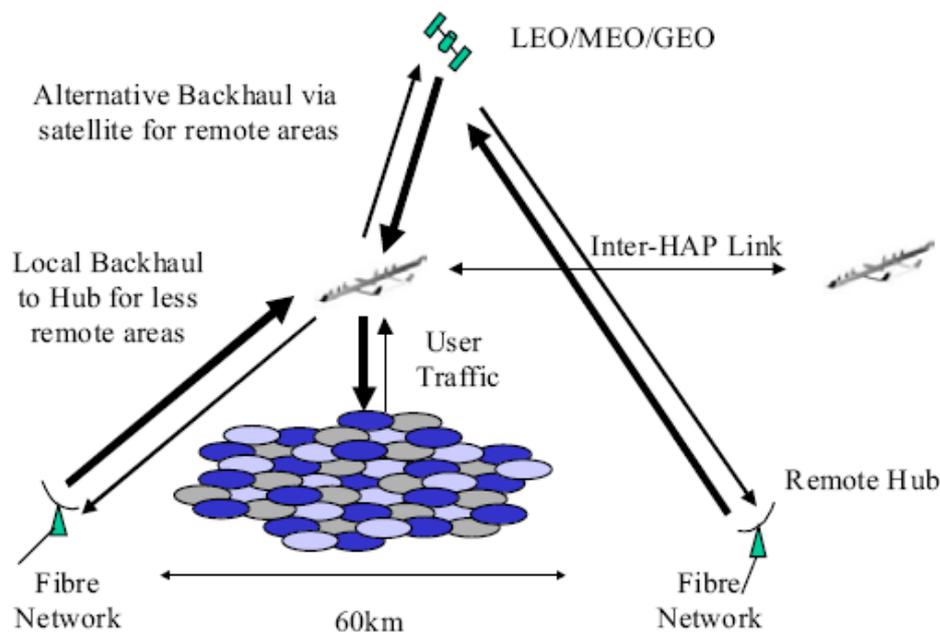
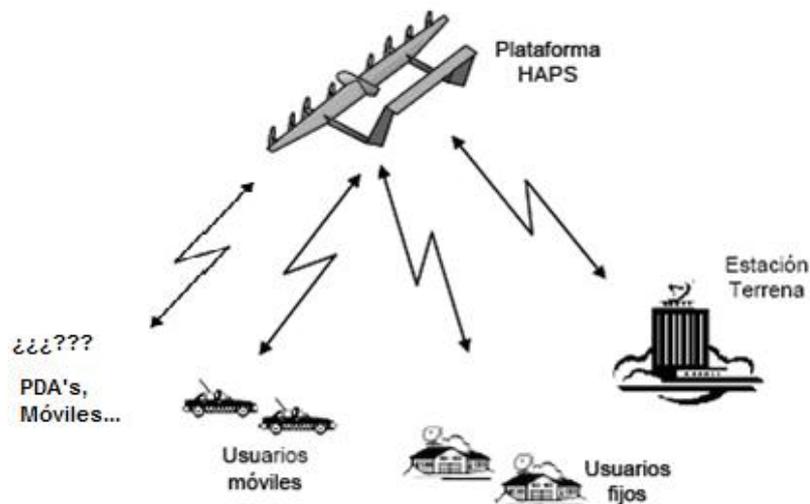


Figura 2: Esquema básico de un sistema HAP y sus enlaces.

Dentro de cualquier sistema de telecomunicación existen una serie de estaciones bases o nodos de acceso y un conjunto de clientes que acceden al servicio por dichos elementos de la red. Anteriormente, los servicios y los nodos estaban tan arraigados al tipo de servicio que sólo se ofrecía el servicio específico. Sin embargo con el paso del tiempo se ha tendido hacia una red única y global de telecomunicaciones basadas en datos. Los sistemas HAP han sido preparados en este sentido para poder otorgar dicha eficiencia a los usuarios y adaptarse a una amplia gama de clientes tal y como muestra la Figura 3.



**Figura 3: Comunicaciones HAPs y usuarios.**

En el sentido de la universalidad del acceso a los sistemas HAP cabe mencionar que el impedimento más destacado se produce a la potencia de transmisión y ganancias de las antenas necesarias en los dispositivos de recepción móviles. Por ello la concepción de los sistemas HAP actuales se basan en otorgar los distintos servicios mediante comunicaciones inalámbricas fijas (FWA). Dicha metodología de conexión limita en términos relacionados con la movilidad del usuario pero otorga una mejor calidad de la señal recibida. En adicción a este hecho, los sistemas basados en estaciones base a gran altitud basan sus comunicaciones en escenarios de visión directa entre transmisor y receptor (LOS). En este proyecto también se supondrá dicho escenario aunque también se realizarán estudios sobre situaciones casi LOS, caracterizados por pérdidas por sombras o Shadowing (debidas a edificios, árboles...).

En términos de servicios también se buscará una universalidad basada en una potente red de datos mediante conmutación de paquetes. Dicha tendencia es de obligado cumplimiento para cualquier tipo de tecnología que desee implementarse actualmente. Para desplegar dicho servicio universal de datos se aplicará la tecnología WiMAX. La elección de dicha tecnología supone una apuesta de futuro para una de los sistemas con mayor potencial y más esperanzadores dentro de las comunicaciones de banda ancha inalámbricas.

Dentro de la tecnología HAP se han caracterizado dos tipos de sistemas en función del tiempo de estancia en órbita de la plataforma. Las de aplicaciones puntuales están basadas en técnicas militares para proporcionar comunicaciones de banda ancha durante limitados tiempos de servicio. Se han realizado numerosas pruebas en Estados Unidos que finalizaron con éxito, como el proyecto HALO (1999). Sin embargo, el reto de las plataformas de gran altitud se centra en conseguir una larga durabilidad de vuelo sin interrupciones. En este sentido se hace referencia a las misiones HAVE (High Altitude Very long Endurance) que pueden durar varios meses o incluso años. Esto condiciona que el sistema no sea tripulado y que tenga métodos de auto suministro energético.

En relación con los servicios otorgables y con el objetivo de obtener comunicaciones de banda ancha se requiere el uso de amplios anchos de banda de frecuencia. En este sentido se estudiará la posibilidad de uso de las bandas milimétricas en conjunción con las ya estandarizadas a modo de conseguir la capacidad necesaria para los distintos servicios.

Como se puede apreciar el estado de la tecnología dentro del marco de las telecomunicaciones ofrece las bases para la realización del sistema. Lo que se requiere es un avance tecnológico y de reducción de costes en el sector aeronáutico y de suministro energético y probar la viabilidad de las telecomunicaciones para las peculiaridades de un sistema HAP.

### **1.3 Motivación y objetivos**

La motivación de este proyecto se centra en la necesidad de implantar una nueva tecnología para el acceso de banda ancha desde un punto de vista de servicio global y económico. En este sentido y tal y como se ha adelantado anteriormente, los sistemas HAP representan una clara solución a ambos retos ofreciendo a su vez una apuesta por una tecnología integradora de servicios digitales.

El objetivo primordial de este proyecto fin de carrera consiste en realizar un análisis exhaustivo del sistema HAP como una red capaz de otorgar distintos servicios de telecomunicación. A lo largo del proyecto, se expondrán diferentes resultados que demuestren la viabilidad técnica del proyecto. Dicho análisis se realizará desde un punto de vista global de las telecomunicaciones, considerando una red multi-servicio y con diferentes escenarios de actuación. Esencialmente el estudio de viabilidad técnica se centrará en:

- Servicios de difusión de video digital mediante las tecnologías DVB para la transmisión de televisión.
  
- Servicios de Internet y datos mediante la tecnología WiMAX.

Una vez analizadas las viabilidades de ambas tecnologías mediante HAP se procederá a un estudio sobre otros aspectos de ingeniería y globales a un proyecto comercial. En este sentido se realizará un análisis desde el punto de vista de los componentes y dispositivos que forman la red y su accesibilidad dentro del mercado tanto actual como futura.

Tras analizar los diversos factores que intervienen en la viabilidad técnica del proyecto se definirán distintos marcos de aplicación. Dichos marcos de actuación vendrán dados tanto por las distintas características físicas del lugar de implantación como por su situación gubernamental: países en vías de desarrollo, zonas de difícil acceso, desastres medio ambientales, guerras...

Por último a modo de proceder a obtener unas conclusiones generales, se analizarán los resultados obtenidos desde un punto de vista global. Dichas conclusiones mostrarán los resultados más característicos obtenidos así como todo aquello que demuestre la viabilidad técnica del proyecto.

Dentro de un marco extraordinario y a semejanza de cualquier tipo de proyecto empresarial se analizará el mismo desde un punto de vista que tengan en cuenta términos de costes e inversiones. Por ello, una de las prioridades consistirá en realizar un correcto análisis de la tecnología y su optimización en términos económicos en cada una de las posibles situaciones. Dichas exposiciones vendrán dadas en el Apéndice A del proyecto. Por último se añade otro apéndice (B) sobre la normativa existente en la cual se detalla más específicamente el caso particular de España.



## **2 CAPÍTULO 2: DVB MEDIANTE HAPs**

### **2.1 Introducción a los servicios**

Los servicios otorgables por cualquier sistema de telecomunicación representan la parte más importante e intrínseca de cualquier proyecto. En este proyecto, se desea mostrar la viabilidad técnica del sistema HAP para otorgar dos servicios universales con gran relevancia mundial. El objetivo es tratar de ofrecer servicios que supongan dos características principales:

- Por una parte se requiere de servicios ya instaurados en la mayoría de los países desarrollados y que hallan ofrecido una clara rentabilidad económica y gran aceptación por parte de los clientes. En este caso el sistema se despliega para ofrecer dichos servicios en caso de que el lugar de implantación no los tuviera (zonas aisladas o países en vías de desarrollo) o cómo medida de seguridad o robustez a los sistemas que ya ofrecen dicho servicio (desastres naturales).
- En otro lugar se requiere tipos de servicio novedosos en sentido tecnológico que ofrezcan mejoras de prestaciones mediante la explotación de dicho avance de forma que compita con tecnologías inferiores que otorguen dichos servicios. En este sentido el objetivo es la instauración de dichos servicios tanto en los países desarrollados (compitiendo en el mercado) como en países de desarrollo como una potente tecnología de rápida aceptación.

En concordancia con lo anteriormente mencionado, primeramente se mostrará el estudio sobre la difusión de video digital como un medio de información básico dentro de cualquier sociedad avanzada. Dicho servicio vital puede ser otorgado mediante los sistemas HAP a diversos lugares o países en vías de desarrollo como medio de comunicación básico. Posteriormente, se analizará y presentará un estudio sobre las nuevas tecnologías de la información mediante redes de datos (Internet) implementando una tecnología de carácter novedoso: WiMAX. En este sentido se presenta un servicio que compite tanto en mercados maduros cómo de nuevo desarrollo.

## **2.2 DVB sobre HAPs**

Cómo se ha descrito en la introducción del proyecto, el sistema HAPs está ideado para otorgar una completa y variada cantidad de servicios de telecomunicación. En dicho sentido, se ha decidido comenzar por el estudio de los servicios de difusión, más concretamente en el de la televisión digital. Primeramente, cabe destacar la importancia de los sistemas de difusión de video y audio como un ancestro servicio dentro de las telecomunicaciones. La posibilidad de transmitir información a conjunto tan elevado y global de clientes utilizando un único canal de comunicación (o recurso) permite una gran eficiencia tanto en recursos utilizados como en los costes repercutidos. Por ello, y debido a que dicha tecnología pertenece a las menos complejas tecnológicamente (comunicaciones simplex), se abordará primeramente el estudio de la misma. Dicha tecnología servirá de introducción al estudio de tecnologías de transmisión dúplex orientadas al tráfico de datos y comunicaciones multimedia.

La difusión del servicio de televisión ha contado principalmente con dos grandes alardes a lo largo de su historia y desde su creación. En un primer lugar el paso de la televisión en blanco y negro a la de color y más recientemente el paso de sistema analógico a digital. Dicho paso ha venido dado por el desarrollo tecnológico tanto de los sistemas de representación y transmisión como por las técnicas de procesamiento de señales. En este sentido los distintos progresos y el vuelco generalizado de los sistemas al mundo digital han producido que la tecnología se encuentre con grandes expectativas de implantación. Además con las nuevas y más potentes modulaciones digitales, que son más robustas frente al ruido y ocupan menor ancho de banda, se ha conseguido una mayor eficiencia y número de servicios otorgables.

Llegados a este punto, la introducción del servicio en un sistema genérico de carácter digital resulta claramente una opción eficiente en términos técnicos. Debido a que los sistemas de televisión son muy susceptible a escenarios sin línea de visión directa o casi visión directa (no se pueden introducir muchas pérdidas por sombra) nuestro sistema HAP encaja dentro del modelo de implantación. La motivación del estudio de difusión de video sobre HAPs viene alentada tanto por sus características físicas como por ser una solución alternativa a los sistemas de difusión terrestre y espacial. En este sentido y dado que las plataformas se sitúan a una gran altura, se obtienen las ventajas de las

comunicaciones por satélite (LOS y grandes áreas de cobertura principalmente). Además dicha característica física se obtiene evitando los tan elevados costes que conlleva la puesta en órbita de los satélites, con lo que se consigue un modelo de negocio más rentable y eficaz.

Con este panorama tan favorable y la relativa sencillez de implementación del sistema debido a la experiencia de las comunicaciones por satélite, se procederá a continuación a realizar un estudio de la viabilidad del sistema tanto en características arquitecturales como en términos de teoría de la señal y propagación de la misma.

### **2.3 Televisión digital**

Hoy en día, la televisión digital es un servicio en vías de implantación que se encuentra en diferentes fases dependiendo del país y continente en estudio. La implantación de dicho servicio esta condicionada al desarrollo del país, por lo que países del primer mundo lo tienen prácticamente en su totalidad implementado mientras que países en vías de desarrollo se están realizando las primeras pruebas. Este hecho, viene condicionado por la cantidad y la calidad de los sistemas terrestres de difusión y por la capacidad de la población de adaptar sus televisores (decodificadores TDT). En este sentido, en España por ejemplo, se proyecta el apagón analógico para el año 2010. Desde el 2004 se empezaron a dar las primeras emisiones y se prevé que a lo largo de estos años la implantación del sistema sea absoluta. Actualmente la televisión analógica y digital comparten los recursos espectrales disponibles. Por otra parte, la cantidad de servicios otorgables que se pueden ofrecer respecto a las antiguas emisiones analógicas son muy cuantiosos, incluso, abriendo la puerta a las tecnologías interactivas (como Internet y servicios multimedia interactivos).

#### *Características de un sistema de televisión digital*

En la historia del servicio televisivo, como se ha mencionado anteriormente, se ha producido un tránsito de la tecnología analógica a la digital. Este cambio ha venido acompañado de una serie de ventajas y servicios adicionales de los que se ofrecían originalmente durante más de cincuenta años. Este cambio al mundo digital ha venido

potenciado a lo largo del tiempo gracias a la tecnología de televisión por satélite (DVB-S). Para poder transmitir la señal unas distancias tan elevadas (GOS: 36000 kilómetros) se requería de las potentes modulaciones digitales. La principal ventaja de la introducción de tecnologías de transmisión digital reside en que permite disminuir el ancho de banda necesario para la difusión de un canal de televisión. En el contexto de los servicios de televisión esto implica la posibilidad de disponer, en el mismo ancho de banda (canal analógico), de más canales que con transmisión analógica. Adicionalmente el uso de la transmisión digital frente a la analógica da lugar a una serie de ventajas de las cuales se destacan:

- Desaparición de numerosas interferencias
- Diferentes resoluciones (SDTV, EDTV, HDTV)
- Guías electrónicas de programación (EGP)
- Transmisión de datos
- TV interactiva avanzada
- Internet

Analizando dichas características cabe resaltar la importancia de algunas de ellas. En un inicio la televisión analógica era un medio de información pasivo en el se ofrecían una serie limitada de canales. Actualmente y con el paso a la tecnología digital, se han incorporado numerosos servicios de índole muy variada. Por ejemplo, el nuevo servicio de televisión digital terrenal proporciona un mayor número de canales, además de los respectivos de radio, diversos servicios relacionados con los distintos programas (contenido, varias pistas de audio, programaciones...). Además, de la posibilidad de mantener servicios como el teletexto y otros novedosos como servicios de radio. Todo ello con una mayor calidad tanto de sonido (sistema de audio digital MPEG-1 o 2 con posibilidad de cinco canales de audio) e imagen (televisión de alta definición HDTV) que ha venido acompañado de nuevas tecnologías en los dispositivos de representación (televisores plasma, SDTV, LCD-HD). Estos factores han dado lugar a un nuevo y amplio abanico de servicios y negocios relacionado con la televisión que se encuentran en desarrollo. Además empiezan a surgir actividades interactivas mediante implementaciones JAVA. Por último y aprovechando los diversos bucles de retorno existentes en la mayoría de los hogares (como par telefónico, fibra óptica o incluso el enlace por satélite) se contempla la posibilidad de otorgar servicios interactivos como Internet, servicios p2p, etc.

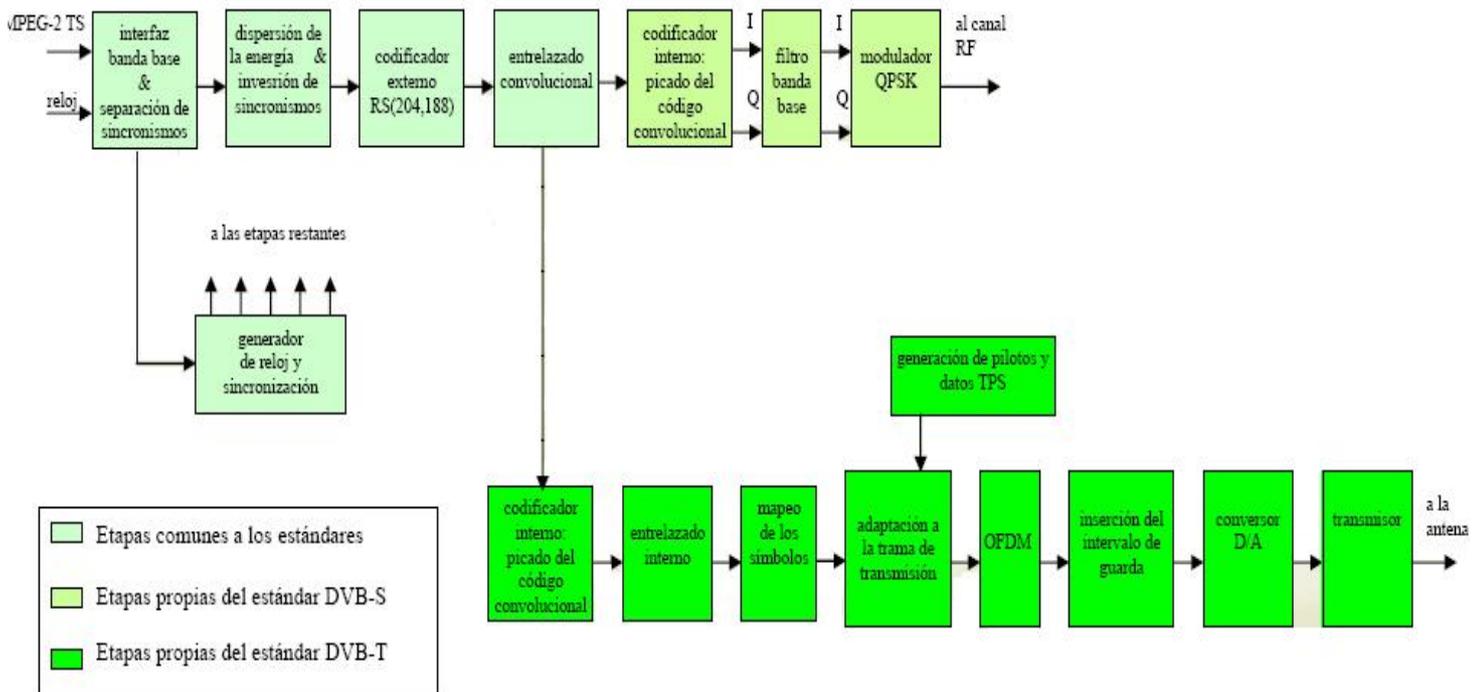
### Estándares DVB

Los estándares han servido a lo largo de la historia como un mecanismo de regulación de los sistemas de telecomunicación. En concreto el caso de los estándares de televisión se ha establecido un enlace entre los mismos y la época en la que fueron generados. En los primeros momentos de despliegue de la televisión en el pasado y debido a la poca globalización mundial se crearon distintos estándares en función de los países de desarrollo (NTSC, PAL, SECAM...). Cómo la existencia de software y técnicas de programación era prácticamente inexistente, el sistema era mecánico y arraigado a los sistemas de representación. Con la introducción de las técnicas digitales se busca un sistema global y común para todos los países. La transmisión de los servicios de video digital se basa en una serie de estándares que definen las características técnicas y de estructura (componentes) del sistema. Actualmente para dicha difusión de servicios digitales de voz, video y datos se usan los estándares internacionales DVB (Digital Video Broadcasting). Este conjunto de estándares se especifican en función del servicio que se desea otorgar (terrestre fijo con DVB-T, terrestre móvil con DVB-H, satélite DVB-T...). Adicionalmente para la codificación de video y audio se utiliza otro importante estándar conocido por las siglas MPEG. Dicho estándar posibilita la transmisión de video digital de alta calidad a tasas binarias acordes con la capacidad del medio de transmisión.

En el estudio sobre la difusión de servicios de video digitales sobre HAPs se va a considerar un sistema regido por el estándar DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestrial) europeo con codificaciones MPEG-2 para video y audio. Esto se debe a la facilidad por parte de los usuarios de encontrar los decodificadores de dicho estándar en el mercado y a su bajo coste.

El proyecto DVB fue fundado en 1993 cómo un consistorio de la industria para globalizar el servicio de difusión de video. Dicho consistorio está formado por más de 270 compañías de difusión, fabricantes, operadores de red y empresas regulatorias de más de 30 países. Más específicamente, DVB establece un marco de trabajo para los servicios digitales basados en MPEG-2. Para ello, se estandarizó las diferentes características y mecanismos de difusión de televisión y de otros servicios asociados. Además, el consorcio DVB se encuentra formado por un conjunto de organizaciones (tanto públicas cómo privadas) lo que garantiza que su evolución estará condicionada al progreso del mercado libre mundial.

A continuación se muestra el diagrama de bloques de un transmisor del estándar DVB con las especificaciones terrenal y satélite (DVB-T y DVB-S respectivamente) para comparar y analizar las diferencias existentes. Se han elegido dichos estándares debido a las similitudes estructurales del sistema HAP con los sistemas terrestre y satélite. En realidad sólo se usa el DVB-T pero existen ciertas ventajas similares a las de DVB-S que se comentarán más adelante.



**Figura 4: Comparativa de diagrama de bloques de un sistema DVB-T y DVB-S.**

Como puede observarse en el gráfico, ambos tienen una parte técnica en común que pertenece a la parte de codificación y al entrelazado convolucional. Por otra parte existen una serie de diferencias en relación con la mayor protección que requiere el sistema terrenal debido al multitrayecto. En este sentido y para lograr una compatibilidad con los sistemas terrestres convencionales se va a proceder a la creación de un sistema similar al terrenal aunque por características físicas (LOS) se asimile más al de la comunicación por satélite. Por otra parte el uso de dicha implementación supone la capacidad de usar modulaciones digitales más potentes (64-QAM como las de la TDT) ya que las del satélite son QPSK debido a los amplificadores de potencia no lineales TWT en transmisión (que

suplen las grandes pérdidas de propagación). Ello proporciona una mayor eficiencia del espectro, otorgando la posibilidad de transmitir a las mismas frecuencias que la televisión digital terrestre convencional.

Como bloque característicos de cualquier sistema de televisión destacamos el codificador de canal Reed Salomón. Su objetivo es introducir redundancia a la señal de información (a nivel de bloque) para poder corregir errores producidos por la propagación. Este codificador suele estar seguido de un entrelazador que desordena la secuencia de bits a transmitir con el objetivo de ser más robusto frente a los errores a ráfagas. Por último y característico de los sistemas terrestres y por satélite se introduce el codificador de picado para añadir una mayor redundancia mediante una codificación de canal convolucional. A continuación se muestra el esquema global de una simulación de dicho sistema en la Figura 5:

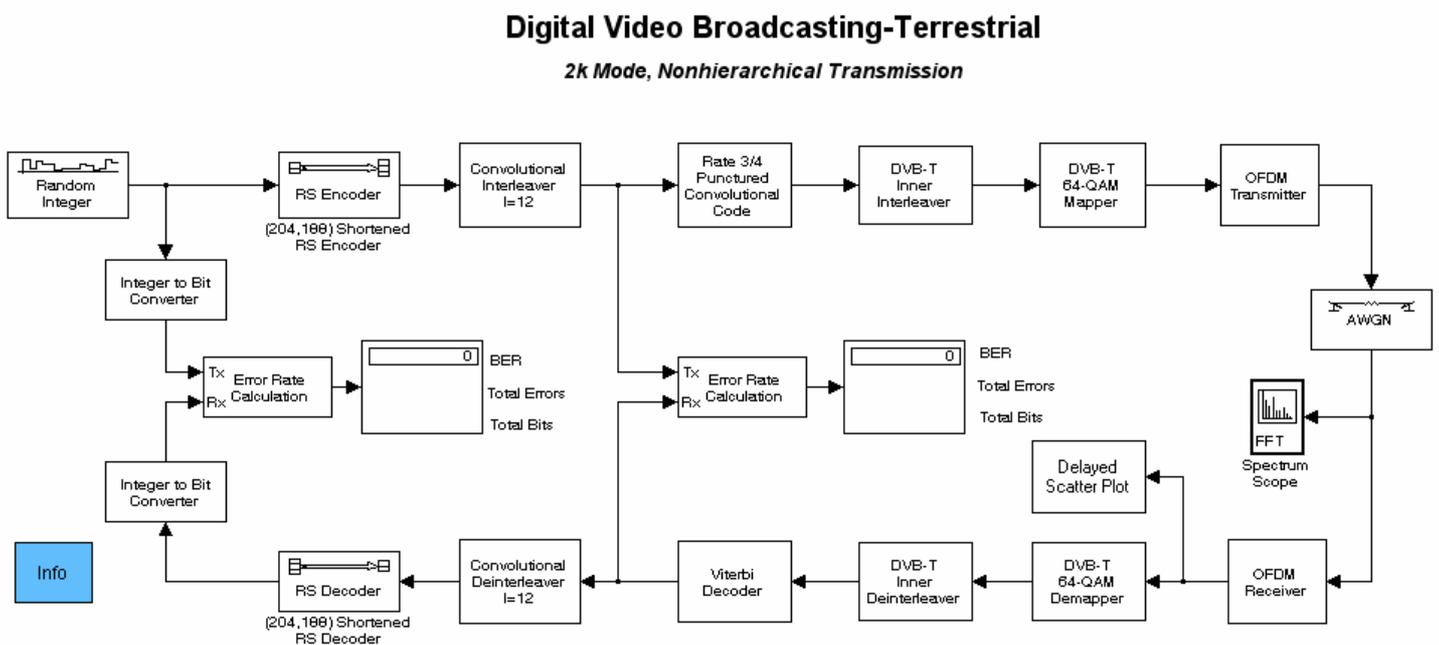
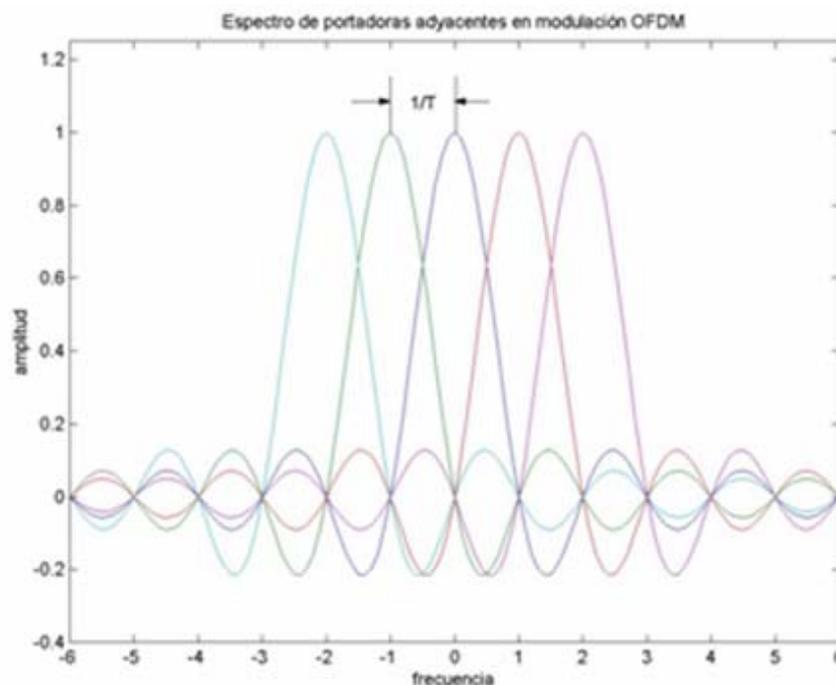


Figura 5: Diagrama de bloques de simulación de un sistema DVB-T.

### Modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Una vez observados los bloques del sistema DVB-T se va a proceder a realizar una introducción de un bloque básico para la optimización de espectro: la modulación OFDM. Esta modulación pertenece al tipo de las FDM (Frequency Demultiplexing Modulation) con la variedad de portadoras ortogonales. Dichas modulaciones se basan en que al dividir el ancho de banda disponible en varios más estrechos se obtiene una función de transferencia del canal prácticamente plana. Para ello se usa en lugar de una portadora, varias de ellas separadas una distancia igual al ancho de banda del canal de transmisión. La característica de ortogonalidad se basa en las funciones tipo sinc (Figura 6) y tiene como objetivo el que la información de un canal para otro diferente es nula en la frecuencia de la portadora. Para ello la distancia de separación entre las portadoras debe ser el inverso al tiempo de símbolo de cada portadora ( $1/T$ ). Esto da lugar a tener señales con menor restricción de ancho de banda evitando tiempos de guarda entre los distintos canales.



**Figura 6: Varias sinc ortogonales que forman OFDM.**

El número de portadoras que puede tener un sistema OFDM va habitualmente desde las dos mil hasta las ocho mil aproximadamente (ver Figura 7). En el caso de televisión digital se habla del caso de ocho mil portadoras por cada canal. A continuación

se muestra el espectro de la suma de las señales que forman el sistema OFDM para las dos configuraciones (2k y 8k portadoras) predominantes:

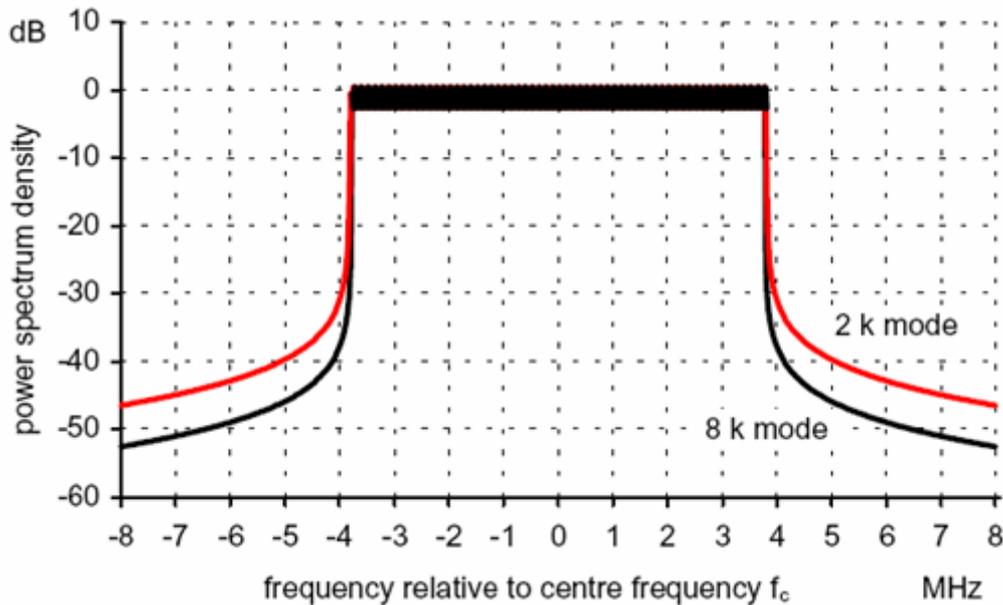
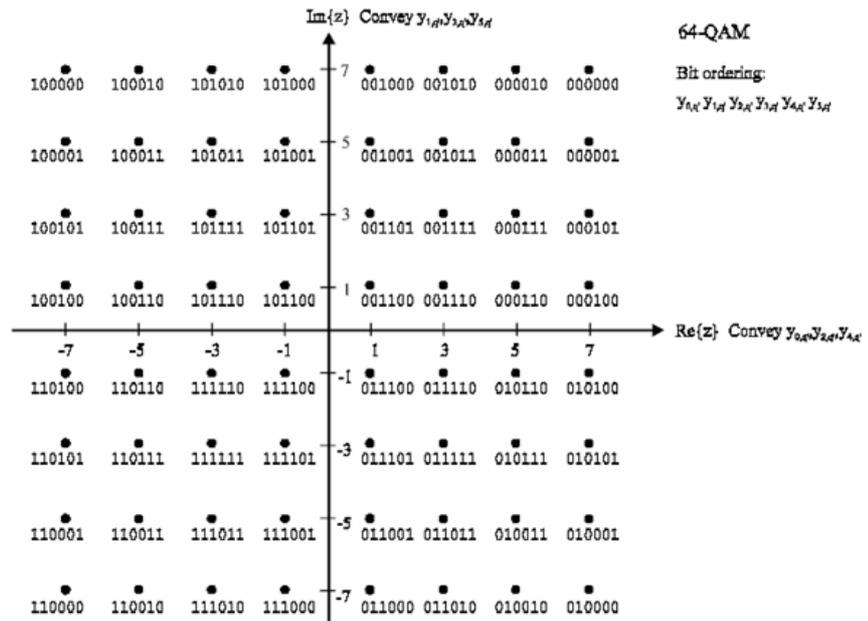


Figura 7: Espectro del sistema OFDM.

Por otra parte en el interior de cada portadora o subcanal, se transmitirá la información deseada. Ese ancho de banda dependerá principalmente del número de portadoras del sistema OFDM y el ancho de banda que ocupa el mismo. En el interior de dicho ancho de banda se puede aplicar una amplia variedad de las modulaciones existentes (QAM, PSK...). El caso más habitual es utilizar modulaciones IQ y como caso particular para la televisión digital 64-QAM. Dicha modulación es muy potente ya que permite transmitir 6 bits por símbolo y es relativamente sencilla. Al consistir en una modulación tanto en fase como en cuadratura (amplitudes), se deberá tener una buena calidad señal a ruido en recepción y un conjunto de amplificadores que no distorsionen la amplitud de la señal. El logro de poder utilizar una modulación tan potente reside en la propia naturaleza del sistema OFDM, ya que como se ha comentado anteriormente, el módulo de la función transferencia del canal se podrá aproximar plana en el ancho de banda del subcanal.

A continuación (Figura 9) se muestra un ejemplo de un mapeo de la modulación 64 QAM mediante una configuración Gray (los símbolos contiguos sólo varían en un bit) para minimizar posibles errores:



**Figura 8: Ejemplo de una modulación 64-QAM.**

El mayor inconveniente de usar un sistema OFDM es la inviabilidad y baja eficiencia técnica que supondría el constar de ocho mil moduladores (en transmisión) y demoduladores (en recepción) para realizar una modulación 64-QAM en cada portadora. En este sentido y para dar una solución a este problema, se implementa el sistema mediante la Transformada de Fourier Discreta (DFT). El procedimiento consiste en realizar la transformada inversa en transmisión mediante los valores de todos los símbolos de los subcanales y deshacer la transformación en recepción. El resultado es similar al de realizar las diferentes modulaciones IQ para cada subcanal del sistema.

Por último y para mejorar las prestaciones de OFDM, los sistemas llevan integrados un prefijo cíclico en el transmisor y su inverso en recepción. El objetivo de este prefijo es evitar la interferencia entre símbolo (IES) sufrida por la señal al propagarse por el medio (debido a la no linealidad en fase y modulo constante del mismo). Para ello se basa en un tiempo de guarda (ajustado a un bloque dependiente de un número fijo de símbolos) y una convolución circular para recolocar los símbolos que han sufrido un retardo.

A continuación en la Figura 9, se muestran los diagramas de bloques de un transmisor y receptor OFDM mediante la implementación por DFT que se ha comentado anteriormente:

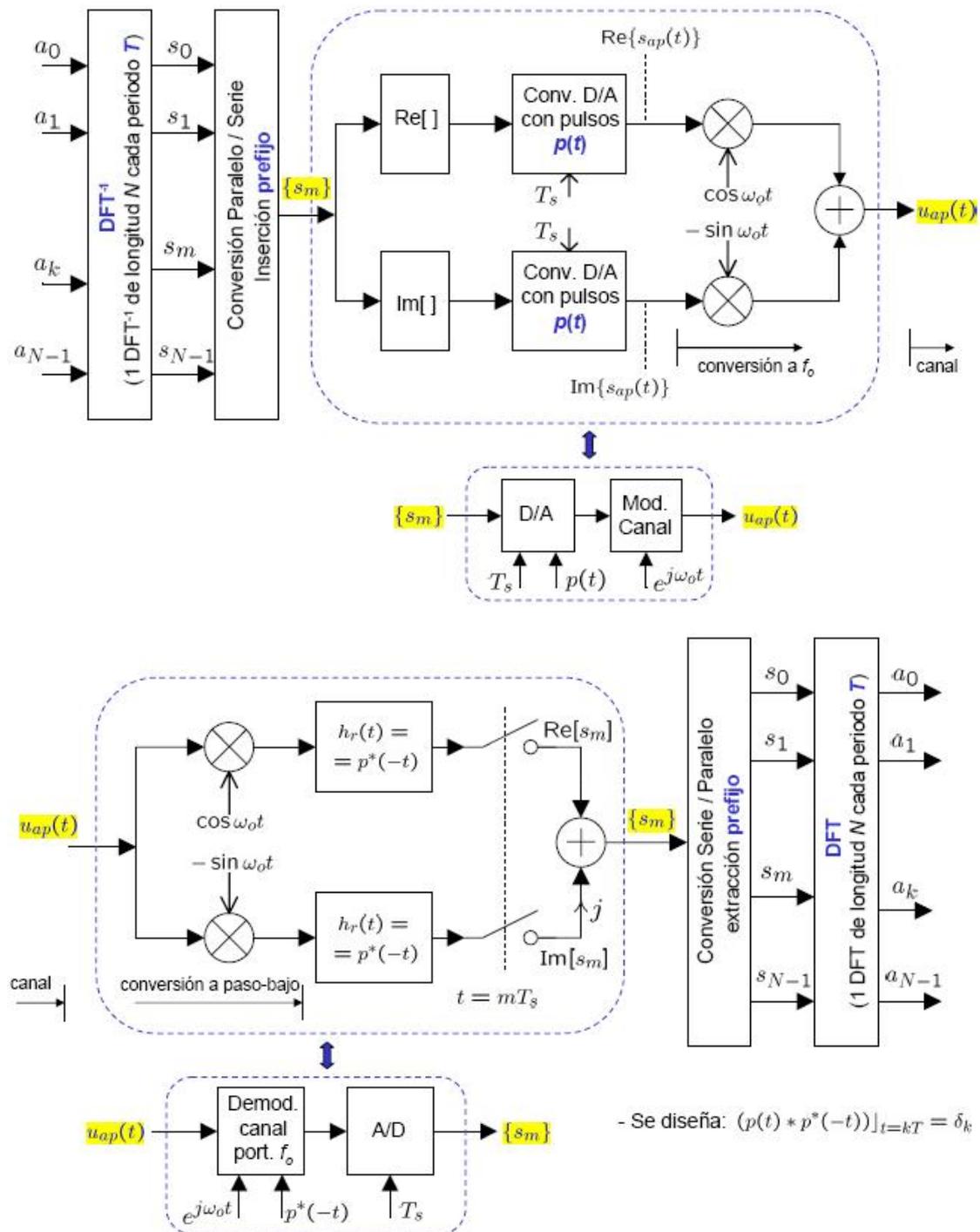


Figura 9: Modulador y demodulador de un sistema OFDM mediante DFT.

Como se observa en las imágenes todo el proceso de la información se realiza de manera digital. Esto permite usar dispositivos programables especializados con una gran capacidad de procesamiento de las señales que permite realizar las DFTs de una manera eficiente. El tramo de conversión analógica en el modulador se realiza al final del proceso

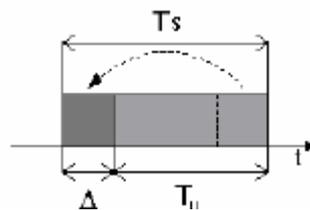
junto antes de la antena. Análogamente en el receptor dicho conversor analógico digital se encuentra justo después de la salida de la antena.

### Tiempo de guarda y velocidad binaria

En todo sistema de telecomunicaciones que utilice el espacio libre como elemento de propagación es indispensable tener en cuenta el efecto del multitrayecto. En recepción debido a los edificios y distintos obstáculos donde se reflejan las señales de información se reciben distintas versiones de una señal retardadas y atenuadas por un cierto valor. Mediante los ecualizadores es posible compensar las distorsiones en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, los retardos de los ecos pueden exceder el tiempo de símbolo lo que produce que unos símbolos interfieran con otros. A este fenómeno se le llama interferencia entre símbolos. El método para poder disminuir su efecto consiste en aumentar la duración del tiempo de símbolo transmitido o aumentar la complejidad en los filtros receptores. Debido a que ello supondría un coste muy elevado que se aplicaría a todos los receptores, es usual optar por la reducción de la velocidad de símbolo.

Para solucionar dicho efecto se crea un tiempo de guarda en el que la información del símbolo es repetida de la parte final a la inicial. Con este método y aplicando las reducciones de tasa binaria para que la interferencia entre símbolos afecte al menor número de puntos posibles se consigue que durante la parte interferente de unos símbolos con otros se de durante el tiempo de guarda. Por otra parte, dicho tiempo de guarda afecta a la capacidad de transmisión del sistema, produciendo una bajada de eficiencia del mismo. Dicha eficiencia viene dada por la siguiente expresión acompañada del gráfico explicativo.

$$\eta = \frac{T_u}{(T_u + \Delta)}$$



Como se ha mencionado anteriormente, el intervalo de guarda implica una reducción en la tasa binaria de nuestro sistema. Además, al aumentar la duración del

símbolo el espacio entre portadoras disminuye y dificulta la recuperación de la señal en recepción.

Por último y para introducir una serie de valores orientativos al sistema fijaremos un tiempo de símbolo cinco veces superior al tiempo de guarda. Si el tiempo de símbolo es de 1ms el tiempo de guarda será de 200ms y el tiempo útil de símbolo de 800us. Con esto la separación entre portadoras será  $1/800=1.25$  KHz. Si suponemos que existen 8k portadoras (6048 de transmisión) y que cada una se modula con una 64-QAM la capacidad del sistema será:

$$R = 6048 \cdot 6\text{bit} / \text{simbolo} \cdot 1\text{simbolo} / \text{ms} = 36\text{Mbps}$$

Para el estándar DVB existen cuatro posibles tiempos de guarda, representados como un porcentaje del tiempo útil: 1/4, 1/8, 1/16, 1/32. A medida que este valor disminuye la eficiencia del sistema aumenta y con ello la tasa de transmisión posible. Dichos cálculos no contienen los efectos de la codificación del canal, por lo que la tasa útil para una tasa de codificación de 2/3 será:

$$R_{\text{util}} = 36\text{Mbps} \cdot \frac{2}{3} = 24\text{Mbps}$$

En el siguiente gráfico se muestran los diferentes valores temporales que se usan para la transmisión de un sistema OFDM de 2048 portadoras.

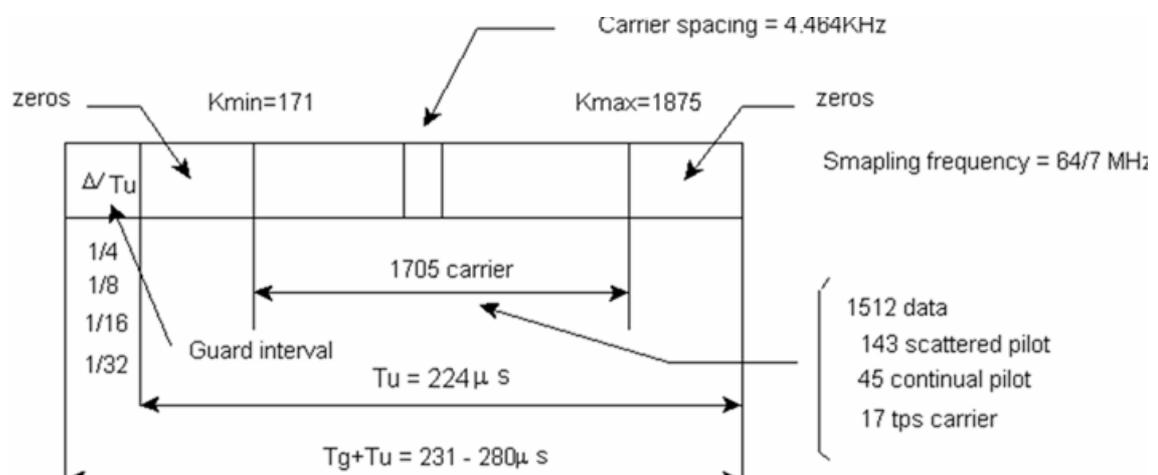


Figura 10: Tiempos globales y de guarda del sistema OFDMA.

Una vez comentada dicha característica de tiempos de guarda de un sistema OFDM se debe resaltar que aunque el sistema HAP también utilice dichos cálculos para adaptarse a la normativa estos no suponen un factor crítico para el mismo. Esto se debe a que la estructura del sistema HAP de visión directa facilita la ecualización de los pequeños retardos que puedan darse.

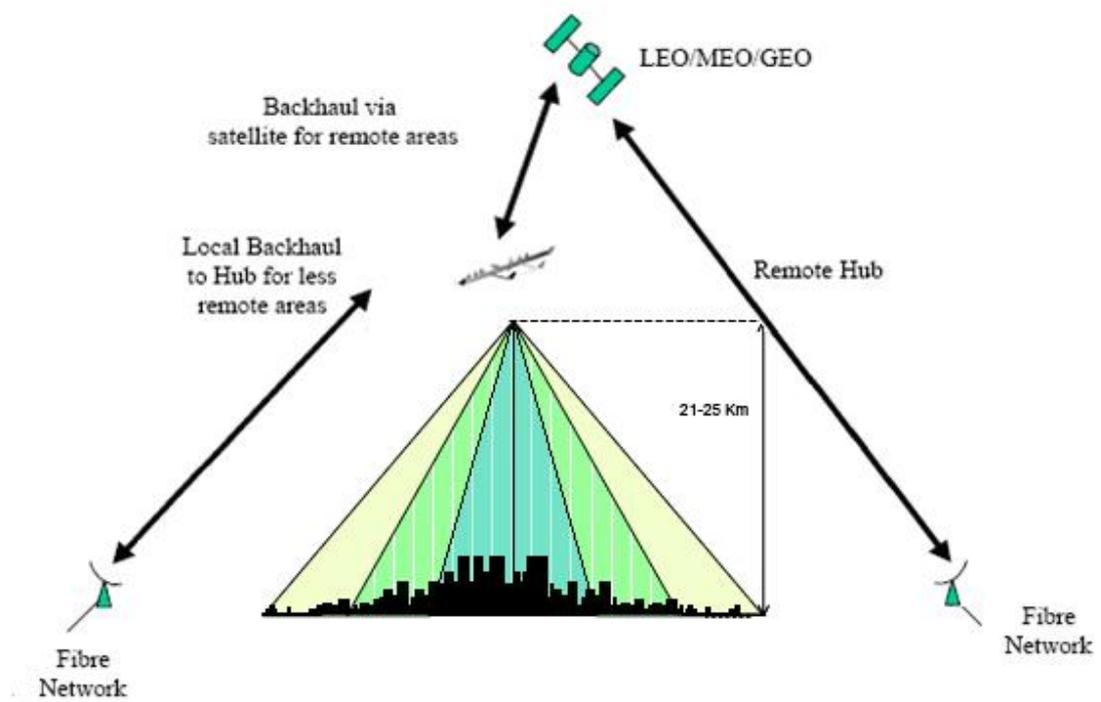
Con el objetivo de resumir lo comentado y tener un listado de valores en relación con las variables anteriormente utilizadas se ofrece la siguiente tabla número 1 que ilustra los dos principales modos para DVB:

Caract/Núm. Port.	2k	8k
Número de portadoras	2048	8192
Número de portadoras útiles	1705	6817
Duración Tu (tiempo de símbolo) (us)	224	896
Espacio entre portadoras (KHz)	4.464	1.116
Ancho de banda ocupado (MHz)	7.612	7.609

**Tabla 1: Valores numéricos de OFDM para 8k y 2k.**

## **2.4 Características técnicas del sistema**

A continuación se procederá a explicar las distintas cualidades físicas y características técnicas que engloban el proyecto. Como se ha recalcado anteriormente el objetivo global es realizar un estudio sobre el sistema para lograr la máxima eficiencia en la difusión de la señal de televisión digital mediante el sistema HAP. Para ello partiremos de un sistema HAP situado a 22 kilómetros de altura sobre la superficie terrestre y un número indeterminado de usuarios dentro de una región dada tal y como se muestra en la Figura 11. Por otra parte, también se tendrá en consideración un enlace ascendente (uplink) que comunicará una estación base terrenal con el HAP. Además el sistema permite otras vías de comunicación (backhaul) como la de por satélite o mediante otro HAP que se encuentre a una distancia accesible. Todos estos elementos que forman la estructura básica del sistema se ilustran gráficamente en la siguiente imagen:



**Figura 11: Arquitectura general y enlaces de un sistema HAP.**

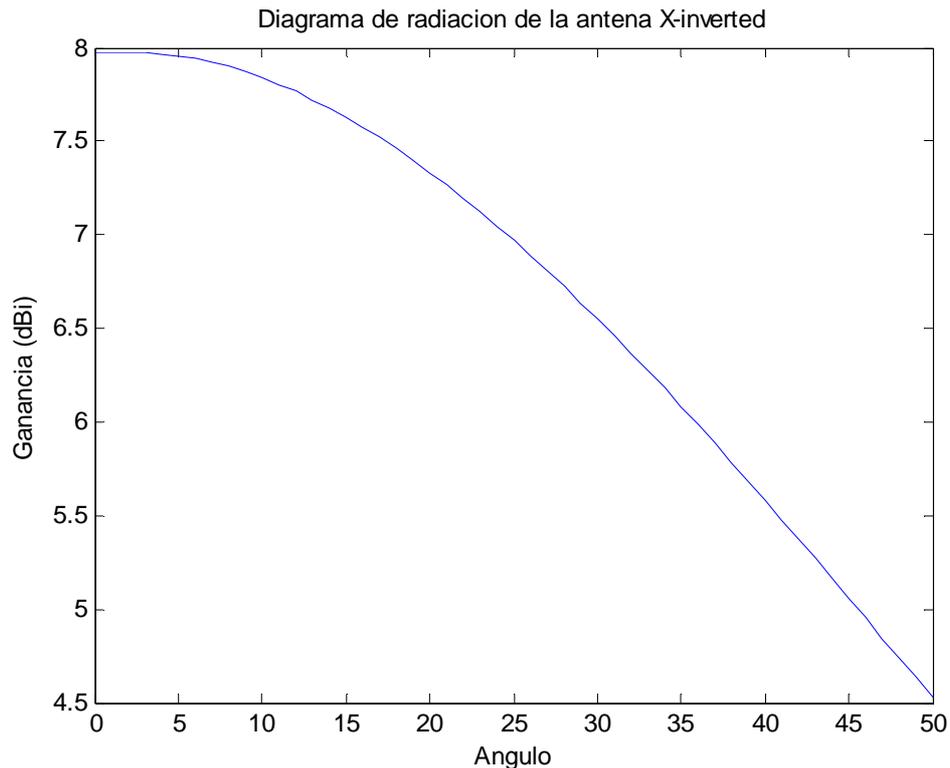
Por otra parte, para describir la composición física del sistema será necesario especificar las antenas y distintos medios físicos utilizados para la comunicación. En este documento se va a omitir el enlace vía satélite debido a que no supondrá un elemento clave

para este proyecto. En el análisis general del sistema se estudiará la cadena de transmisión y recepción y las antenas utilizadas. Los bloques de transmisión y recepción serán estudiados más adelante en la parte de parámetros de teoría de la señal. Por lo tanto restan cuatro tipos de antenas: recepción y transmisión del HAP, transmisión del enlace ascendente y recepción de los usuarios finales. Para la simulación del enlace descendente, vamos a tener en cuenta un sistema formado por una serie de antenas de tipo X-inverted tanto en el transmisor del HAP como en los receptores de los usuarios. Sin embargo, para el enlace ascendente entre la estación base terrenal y el HAP, las antenas serán distintas con una ganancia más elevada debido a su mayor directividad. Las características técnicas de dichas antenas vienen dadas a continuación:

#### Antena X-inverted

La antena X-inverted es la antena elegida debido a su compromiso entre su diagrama de radiación (anchura de haz vertical a 3dB de 92°) y su ganancia. Además su límite físico de diagrama de radiación (180°) se encuentra situado a 15dB por debajo del máximo.

Como se puede observar en la siguiente imagen (Figura 12), la función de ganancia de la antena viene dada según el ángulo de incidencia de la señal. Por lo tanto, para los puntos más externos de la zona de cobertura, se producirá una caída de potencia recibida debido a la disminución de la ganancia de ambas antenas (transmisora y receptora). Debido a que la plataforma se encuentra situada a 22 kilómetros de altura y se requiere abarcar un área de aproximadamente otros 22 kilómetros (ciudad media grande) solamente se muestran hasta ángulos de 50°.



**Figura 12.- Ganancia de la antena X-inverted.**

### Antena del enlace ascendente

Para el enlace ascendente se opta entre dos opciones dentro del margen de operación. Por una parte podremos utilizar una frecuencia de portadora cercana a los Giga hertzios que nos permita usar unas frecuencias distintas a las del enlace descendente. Esto nos proporcionará un mayor ancho de banda y menores interferencias entre señales. Sin embargo, el uso dichas frecuencias, requiere de una serie de búferes y de convertidores de frecuencia en el HAP bajar la frecuencia las señales recibidas por el enlace ascendente en las que posteriormente se emitirán por el descendente. Por otra parte, podremos usar las mismas frecuencias en el enlace ascendente, fijando el ancho de banda y produciendo unas leves interferencias gracias a la directividad de las antenas. Cuando se analice el sistema receptor-transmisor del HAP se observará que se ha optado por la primera opción debido a que el ligero incremento de complejidad que requiere compensa con una disminución de las interferencias.

En esta ocasión y debido a que las antenas se encuentran orientadas una hacia a la otra, las ganancias de las mismas aumentan respecto al uso de las antenas dedicadas al

enlace de descenso. Por ello se han tomado una ganancias de las antenas transmisora (Base fija en tierra) y receptora (HAP) son respectivamente: 16,5 y 13 dB aunque podrían fácilmente llegar a ser más elevadas. Dichas antenas pueden ser parabólicas u otras de carácter directivo. Al final del proyecto en la sección de ingeniería y elementos claves se podrán observar algunos prototipos de dichas señales.

## **2.5 Parámetros de la teoría de la señal y propagación**

Una vez analizados las antenas utilizadas se procederá a formular los diferentes fenómenos que influyen en las cadenas transmisora y receptora del sistema. Debido a la gran complejidad y el amplio espectro de factores que condicionan la misma, se expondrá de la forma más precisa dichos factores, siendo dividido el estudio en diversos bloques. Cada una de ellos tendrá como objetivo, exponer el factor lo más concisamente posible teniendo en cuenta su relativa importancia en relación con los demás. Se comenzará realizando una subdivisión en dos escenarios, uno ideal de visión directa entre las antenas y otro con unas ligeras pérdidas debido a obstáculos.

### **1<sup>er</sup> Escenario de visión directa (LOS)**

Como se ha mencionado anteriormente en la introducción, la idea y desarrollo de los HAPs como sistema para la difusión de televisión digital viene motivada por adquirir las dos principales ventajas de los sistemas actuales más implantados (TDT y televisión por satélite). El hecho de su elevada altitud proporciona una característica de vista de acceso directo que disminuye los requisitos técnicos del sistema. Un escenario de visión directa es aquel en el que la antena transmisora y receptora tienen un camino directo visual, es decir no existe un objeto sólido u opaco que se interponga entre ambas. Es muy común que en las conexiones de comunicación sin cables (radio enlaces) que las antenas se encuentren en visión directa para poder transmitir entre estaciones situadas a grandes distancias. En el sistema HAP y como en el caso de difusión por satélite, las antenas receptoras se situarán en el tejado de los edificios, garantizando de esta forma un gran porcentaje de vista directa entre todas las antenas receptoras y la transmisora (HAP). Las ventajas que proporciona un sistema LOS son principalmente las bajas pérdidas de por

multitrayecto y sombra con su consiguiente rebaja de potencia de transmisión necesaria y el bajo número de recursos físicos disponibles cubriendo una gran área de cobertura.

A causa de la gran cantidad de factores que influyen en la comunicación se dividirá el estudio en tres partes. Primeramente se estudiarán los factores externos de la comunicación, es decir, pérdidas por la propagación, fenómenos físicos, factores meteorológicos, etc. Por otra parte, se determinarán los factores intrínsecos a los dispositivos que intervienen tanto en el receptor como en el transmisor, como por ejemplo: Sensibilidad, factor de ruido, modulaciones...; Por último se integrarán las dos últimas partes para obtener un balance global y representativo de las limitaciones del sistema.

### **Pérdidas externas**

En el estudio de los fenómenos físicos que ocurren durante la propagación de la señal por medio del aire, la característica predominante es la aleatoriedad. A consecuencia de esto y con el objetivo de obtener los desvanecimientos y atenuaciones que sufre una señal no se aplicarán expresiones físicas complejas que tengan en consideración todos los fenómenos físicos (ecuaciones de Maxwell) presentes durante la propagación. En su lugar, aproximaremos dicho conjunto de fenómenos que provocan el desvanecimiento de la señal por expresiones semi empíricas. El objetivo es tener en cuenta los diferentes y principales factores que afectan a la comunicación (distancia y frecuencia) aproximando a las pérdidas que producen con un conjunto de constantes.

En primer lugar y suponiendo una comunicación con visión directa se define el factor limitante de la comunicación las pérdidas como las del espacio libre. Estas pérdidas vienen dadas por la siguiente expresión:

$$L_{fs} (dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad \text{Ecuación. 1}$$

En esta expresión  $d$  es la distancia y  $\lambda$  la longitud de onda y ambas son utilizadas en unidades del sistema internacional (metros).

Como se aprecia directamente de la misma a mayor distancia, mayores pérdidas y de la misma forma a mayor frecuencia o menor longitud de onda ( $\lambda=c/f$ ) las pérdidas también aumentan. La primera es una afirmación simple, ya que al recorrer mayor distancia los choques con las partículas del medio se incrementarían y su desvanecimiento será mayor. La segunda viene dada a que a una menor longitud de onda, el camino eléctrico ( $\text{distancia}/\lambda$ ) que recorre la señal será mayor y por lo tanto la señal sufre mayor atenuación.

Dentro de las pérdidas externas cabe destacar los distintos fenómenos meteorológicos que pueden interferir en el sistema. En este sentido podrán producirse pérdidas por condiciones climatológicas adversas como nubes, precipitaciones, nieblas, etc. Por otra parte las características intrínsecas del propio medio de transmisión condicionarán e introducirán una serie de pérdidas. Dentro de este campo se puede tener en consideración por ejemplo los gases que forman la atmósfera. En relación con ambas pérdidas, la atenuación que se produce sobre la señal de información es directamente proporcional a la frecuencia de la misma. Al encontrarlos en las bandas de transmisión de la televisión digital terrestre (470- 862 Mega Hertzios), las pérdidas producidas por dichos fenómenos son prácticamente nulas. En las simulaciones que se presentarán más adelante las pérdidas por dichos fenómenos han sido despreciadas.

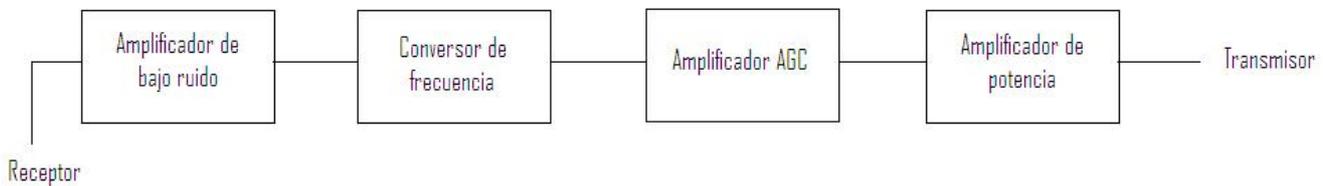
### **Pérdidas internas**

A continuación se va a proceder a caracterizar los dispositivos que forman la cadena de transmisión y recepción del sistema a fin de su evaluar su efecto sobre la señal.

#### **Obtención y transmisión de la señal**

En el caso del enlace ascendente (estación terrenal-HAP) la señal recibida por la plataforma se supone que llega con una calidad (en términos de potencia y distorsión) muy buena debido a las potentes antenas directivas, por lo que el dicho enlace no limita la viabilidad del sistema. Además de las altas ganancias de dichas antenas directivas se utilizará una banda de frecuencias libre de interferencias para el enlace por lo que se obtienen unas grandes prestaciones. Al recibir la señal la plataforma deben realizarse dos funciones: por una parte se tiene que transformar la frecuencia de la señal mediante mezcladores y por otra realizar una serie de etapas de amplificación sin distorsión para

poder retransmitir la señal. En la siguiente figura número 13, se muestra dicho diagrama de bloques:



**Figura 13.- Diagrama de bloques del sistema repetidor TDT del HAP**

Como puede observarse en la figura el sistema se encuentra compuesto por una serie de amplificadores y convertidores de frecuencia. Dichos elementos son caracterizados con su factor de ruido o pérdidas y la ganancia. Dichos valores al igual que las pérdidas externas condicionan las potencias de transmisión e integridad de la señal. Por otra parte estos vienen dados según las especificaciones de los productos realizadas por los fabricantes. A continuación en la Tabla 2 se muestran los valores representativos de dichos que han sido utilizados para la obtención de las pérdidas introducidas por dicho bloque:

Bloque	Características
<b>Amplificador de bajo ruido (LNA)</b>	<b>Ganancia = <math>(30 \pm 2)</math> dB, Factor de ruido = 1 to 2 dB</b>
<b>Convertor de frecuencia (FC)</b>	<b>Pérdidas de conversión &lt; 10 dB, Potencia del oscilador local &lt; 10 dBm</b>
<b>Amplificador AGC</b>	<b>Ganancia = <math>(54 - 66)</math> Db</b>
<b>Amplificador de potencia</b>	<b>Ganancia = <math>(30 \pm 1)</math> dB, Potencia de salida = <math>(de 5 a 10)</math> W</b>

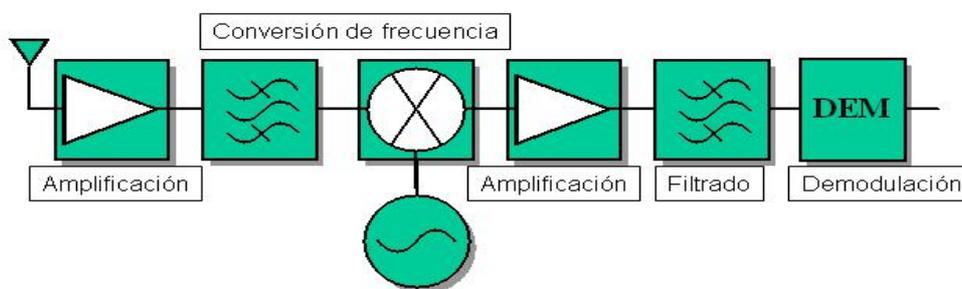
**Tabla 2: Características del diagrama de bloques del transmisor HAP.**

Finalmente con dichos valores que han sido obtenidos a partir de las hojas de los fabricantes se puede obtener una potencia de transmisión equivalente del HAP. Dicho valor vendrá dado por la ganancia de los amplificadores menos las pérdidas de los

componentes pasivos (mezcladores, acopladores, cables..) y será usado para las simulaciones como si sólo hubiera un transmisor que genera la señal.

### Recepción de la señal

Una vez obtenida la potencia transmitida por la plataforma el bloque que limita la comunicación corresponde al receptor. En este caso, debido a las bajas frecuencias utilizadas se va a considerar que el sistema se encuentra limitado por ruido en lugar de por ganancia. Esto se debe a que en bajas frecuencias la posibilidad de obtener en el mercado amplificadores de alta ganancia es relativamente sencilla y económica. En primer lugar se procede a obtener el factor de ruido del bloque receptor como el de la Figura 14.



**Figura 14: Diagrama de bloques del receptor.**

Dado que el sistema forma una cadena de cuádrupolos se procederá a la obtención de dicho factor de ruido con la fórmula que lo caracteriza. Según esto, aplicamos la expresión:

$$f_{\text{sistema}} = f_1 + \frac{f_2 - 1}{g_1} + \frac{f_3 - 1}{g_1 \cdot g_2} + \dots + \frac{f_N - 1}{g_1 \cdot g_2 \cdot \dots \cdot g_{N-1}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

En dicha expresión N equivale al número total de cuádrupolos y  $g_i$  corresponde a la ganancia correspondiente al cuádrupolo i. A la hora de aplicar dicha expresión sobre un componente pasivo, las pérdidas del mismo será su factor de ruido y la ganancia del mismo será igual al inverso de las pérdidas. Por tanto y aplicando los valores anteriormente obtenidos sobre la expresión expuesta, se obtiene un factor de ruido del sistema de aproximadamente 3 decibelios.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que en el receptor tenemos unas pérdidas producidas por la temperatura de la antena receptora y un cable atenuador. Al añadir el efecto de la temperatura producido por la antena se obtiene un factor de ruido total de 4

decibelios. Por otra parte el cable utilizado para suministrar la señal recibida a los distintos usuarios del sistema de TDT introduce unas pérdidas de propagación (en la simulación se consideran 4 dB).

Continuando con el análisis del sistema receptor y una vez obtenido el factor de ruido del sistema, se procede a delimitar la potencia de ruido que se obtendrá en la recepción. La expresión para obtener la potencia de ruido de un sistema receptor viene dado por el factor de ruido del sistema y depende del ancho de banda de la señal información. Esta relación es debida a que contra mayor sea el ancho de banda de la comunicación, mayor ruido no podrá ser eliminado por los filtros situados en recepción. Dicha potencia de ruido se evalúa por la siguiente expresión:

$$N(\text{dBm}) = -114 + NF + 10 \log_{10}(B)_{\text{MHz}} \quad \text{Ecuación 3.}$$

En esta expresión NF es el factor de ruido del sistema (en decibelios) obtenido en el apartado anterior y B es el ancho de banda de un canal de televisión (en Mega Hertzios). En este sentido se ha considerado el ancho de banda de un canal de televisión, debido a que se considera que los filtros en recepción estarán adaptados al mismo.

Tras haber calculado la potencia de ruido en recepción la señal mínima detectable o sensibilidad (S) se obtiene directamente con la señal a ruido necesaria en recepción. Todo esto se resume por la siguiente expresión:

$$S(\text{dBm}) = N + SNR_{\text{min}} \quad \text{Ecuación 4.}$$

En esta ecuación  $SNR_{\text{min}}$  corresponde a la cantidad de señal a ruido necesaria para cumplir una tasa de error dada. Dicha relación vendrá dado por las distintas modulaciones y probabilidades de error admisible que serán estudiadas a continuación.

En un primer lugar y para introducir los valores generales que se utilizaran en las simulaciones, se situará la frecuencia de operación del sistema desde los 470 hasta los 862 Mega Hertzios. Por ello, la frecuencia central del sistema se situará en torno a los 650 Mega Hertzios.

En relación con estos márgenes de frecuencia y con los tres posibles anchos de banda de canal del estándar DVB (8, 7 y 6 MHz) la simulación vendrá dada por un ancho de banda teórico de 7.6 MHz (8 MHz teóricos). Además y como se ha mencionado anteriormente se asumirá que los canales de televisión tienen un ruido de 6 decibelios.

A continuación en la Tabla 3, se expone con las distintas relaciones señal a ruido mínimas, necesarias para una tasa de error determinada. En esta ocasión y debido a que son datos extrapolados de casos prácticos los datos se encuentran referidos a una tasa de error de bloque (BER) de  $2 \times 10^{-4}$ . Además para dicha tasa de error y las distintas modulaciones se muestran los principales modelados de canales (Gausiano, Ricean y Rayleigh). Por último y como un dato más práctico, se definen las diferentes velocidades binarias para cada uno de los factores anteriormente mencionados y para los diferentes tiempos de guarda en Mega bits por segundo.

Modulation	Code rate	Required C/N for BER = $2 \times 10^{-4}$ after Viterbi QEF after Reed-Solomon			Bitrate (Mbit/s)			
		Gaussian channel	Ricean channel ( $F_1$ )	Rayleigh channel ( $P_1$ )	$\Delta T_U = 1/4$	$\Delta T_U = 1/8$	$\Delta T_U = 1/16$	$\Delta T_U = 1/32$
QPSK	1/2	3,1	3,6	5,4	4,98	5,53	5,85	6,03
QPSK	2/3	4,9	5,7	8,4	6,64	7,37	7,81	8,04
QPSK	3/4	5,9	6,8	10,7	7,46	8,29	8,78	9,05
QPSK	5/6	6,9	8,0	13,1	8,29	9,22	9,76	10,05
QPSK	7/8	7,7	8,7	16,3	8,71	9,68	10,25	10,56
16-QAM	1/2	8,8	9,6	11,2	9,95	11,06	11,71	12,06
16-QAM	2/3	11,1	11,6	14,2	13,27	14,75	15,61	16,09
16-QAM	3/4	12,5	13,0	16,7	14,93	16,59	17,56	18,10
16-QAM	5/6	13,5	14,4	19,3	16,59	18,43	19,52	20,11
16-QAM	7/8	13,9	15,0	22,8	17,42	19,35	20,49	21,11
64-QAM	1/2	14,4	14,7	16,0	14,93	16,59	17,56	18,10
64-QAM	2/3	16,5	17,1	19,3	19,91	22,12	23,42	24,13
64-QAM	3/4	18,0	18,6	21,7	22,39	24,88	26,35	27,14
64-QAM	5/6	19,3	20,0	25,3	24,88	27,65	29,27	30,16
64-QAM	7/8	20,1	21,0	27,9	26,13	29,03	30,74	31,67

NOTE: Figures in italics are approximate values.

Quasi Error Free (QEF) means less than one uncorrected error event per hour, corresponding to BER =  $10^{-11}$  at the input of the MPEG-2 demultiplexer.

**Tabla 3: SNR necesaria en función de tiempo de guarda, modelado de canal y modulación para una BER= $2 \times 10^{-4}$  y tras decodificador de Viterbi y Reed-Solomon.**

Aplicando los datos obtenidos y utilizando la tabla ya comentada se evaluarán las expresiones según el lugar de implantación del sistema. En el caso de España el sistema TDT se encuentra diseñado mediante una modulación 64 QAM, con un tiempo de guarda de  $\frac{1}{4}$  y una tasa de codificación de  $\frac{2}{3}$ . Como se puede observar en la tabla dichas condiciones requieren una señal a ruido mínima de 19,3 decibelios para garantizar la mencionada tasa de error para los tres modelos que se han tenido en consideración.

Por tanto y según los datos desprendidos anteriormente podemos obtener la sensibilidad o potencia mínima en recepción de -78 dBm (tomado por ejemplo una SNR<sub>mín</sub> de 21 decibelios). Para la antena del tejado asumiremos unas pérdidas secundarias de 4dB mientras que para la de interior tan solo 1 decibelio.

### **Balance general**

Por último y para cerrar el bloque del análisis de la señal del sistema se procede a realizar el balance global del enlace. En este caso y teniendo en consideración que se da un sistema LOS donde el HAP se encuentra por encima de los distintos edificios, consideramos un desvanecimiento por sombras despreciable. La potencia recibida en relación con lo anteriormente comentado vendrá dada por la siguiente expresión:

$$P_r = P_t + 2G(\phi) - L_{fs} - L_f - L_{otras} - M \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

- $P_t$  es la potencia transmitida en dBm,
- $P_r$  es la potencia recibida en dBm,
- $G$  es la ganancia de la antena HAP en la dirección de la antena receptora,
- $L_f$  son las pérdidas secundarias totales del transmisor y receptor,
- $L_{fs}$  son las pérdidas de propagación por el espacio libre,
- $L_{otras}$  otras pérdidas como por difracción, vapor, lluvia... y
- $M$  es el margen del enlace de bajada. Le hemos otorgado 5 dB de compensación para los cambios de ganancia de las antenas y los posibles cambios en las pérdidas de propagación.

En otra posible aplicación de la ecuación se asignará la potencia de recepción como fija dada por la sensibilidad mínima del sistema y se despejará las pérdidas por espacio libre. Aplicando la ecuación de dichas pérdidas se obtendrá la máxima distancia de cobertura del sistema. Esta distancia limita la altura del HAP y por otra parte el radio máximo de cobertura del sistema.

## **2º Escenario de visión no directa (NLOS)**

Hasta ahora se ha realizado el desarrollo matemático y los diferentes cálculos suponiendo que entre las antenas transmisora y receptora existía un enlace de visión directa. Sin embargo la capacidad de proporcionar un sistema LOS en el 100% de los casos es prácticamente inviable en una ciudad de grandes dimensiones como Madrid. La altura 5 o 6 veces superior de los edificios de grandes envergaduras respecto al de los edificios de la población civil, representan un claro impedimento para que se den las condiciones LOS.

Al analizar el estudio de un escenario de visión no directa se debe tener en consideración todos los razonamientos, estudios y cálculos realizados en el caso de visión directa. La variación residirá pues en que la señal sufre una mayor atenuación por un desvanecimiento por sombra adicional que deberá ser unido a las pérdidas y limitaciones del sistema calculados anteriormente. Por ello el sistema y más concretamente la sensibilidad del mismo deberá contar con unos ciertos márgenes que vendrán dados por las características físicas del tramo final del enlace.

Cómo evidentemente es de suponer, se considerará que el cielo no suele estar repleto de objetos y por lo tanto, los impedimentos físicos para la señal consisten en edificios, árboles y demás elementos situados sobre la superficie terrestre. Dado que dichas pérdidas dependerán de numerosos factores inabarcables por nuestro estudio (orografía muy detallada), se propondrá un modelo de pérdidas por sombra en función del ángulo de incidencia de la señal, más una atenuación constante que representa unas pérdidas mínimas. Este modelo se basa en que a mayor ángulo de incidencia la probabilidad de que un edificio alto ‘de sombra’ a otro es mayor y por lo tanto las pérdidas aumentan. Según lo

mencionado anteriormente asociado a una comunicación de visión directa pero con una serie de obstáculos se asumirán las siguientes pérdidas:

$$L_{sombra} (dB) = 10 \cdot \left( \frac{\alpha}{90} \right) + 1 \quad \text{Ecuación 6.}$$

Cómo se introdujo anteriormente  $\alpha$  es el ángulo de penetración medido desde la vertical y las pérdidas vienen dadas en decibelios. Las pérdidas por sombra oscilarán entre un margen de 1 y 6 dB, ya que para el caso de querer obtener las pérdidas de interiores deberá de utilizarse modelos más detallados.

## **2.6 Simulaciones**

Tras haber analizado el sistema de difusión de televisión y los parámetros teóricos relacionados con el mismo se procederá a presentar una serie de simulaciones. Para ello se ha servido de la aplicación software de programación Matlab, el cual en adicción a ser una potente herramienta se adapta al contexto de nuestro sistema. El objetivo de este apartado es mostrar mediante pruebas experimentales la viabilidad del proyecto en términos de teoría de la señal. En este sentido, se procederá a parametrizar los principales factores que se definieron en las etapas teóricas. Debido al gran número de dichos factores que influyen en el sistema, en cada simulación se enunciarán las características y naturaleza de los mismos que se proceden a estudiar y el método con el que se ha procedido para calcularlos. Por otra parte, se realizará una exposición en forma gráfica con comentarios adjuntos, que tratarán de explicar de la forma más concreta y concisa posible los resultados obtenidos. Dichos comentarios, están condicionados a la simulación en concreto por lo que tras las simulaciones se realizará unas conclusiones globales que jerarquizaran los factores que intervienen en las mismas.

### **2.6.1 1ª Simulación: SNR vs POTENCIA DE TRANSMISIÓN**

En la mayoría de los sistemas de telecomunicación, uno de los factores limitantes y por lo tanto más importantes, reside en las potencias de transmisión de los terminales. En algunas ocasiones el objetivo es otorgar la capacidad de movimiento de pequeños

dispositivos móviles mientras que en otros la dificultad reside en la obtención de los recursos energéticos. En nuestro sistema y al tratarse de una comunicación punto a multipunto (difusión) sólo existe una potencia de transmisión correspondiente a la del transmisor del HAP. En los sistemas de televisión digital terrestre convencionales (estaciones base terrestres) la potencia de transmisión no suele ser un factor crítico debido a la capacidad de suministro eléctrico mediante el cableado convencional. Por ello, se utilizan muy altas potencias de transmisión que son capaces de cubrir grandes áreas (varios kilovatios). Sin embargo el hecho de usar plataformas aéreas para conseguir un escenario de visión directa limita la capacidad de suministro eléctrico siendo necesaria la implantación de potentes baterías en el HAP. Según esto y teniendo en cuenta el requerimiento energético de mantener la plataforma a una altura estable, queda evidenciado la necesidad de una potencia de transmisión eficiente.

En esta simulación se ha considerado un área de cobertura circular con un radio de 20 kilómetros con centro físico situado en la perpendicular del HAP con la superficie terrestre. Dicha cobertura es aproximadamente el área de la ciudad de Madrid con algunos de los núcleos urbanos periféricos más importantes. Con estas consideraciones de dimensión y la anterior mención de una potencia de transmisión eficiente se procederá a realizar las simulaciones para bajas potencias de transmisión (varios vatios).

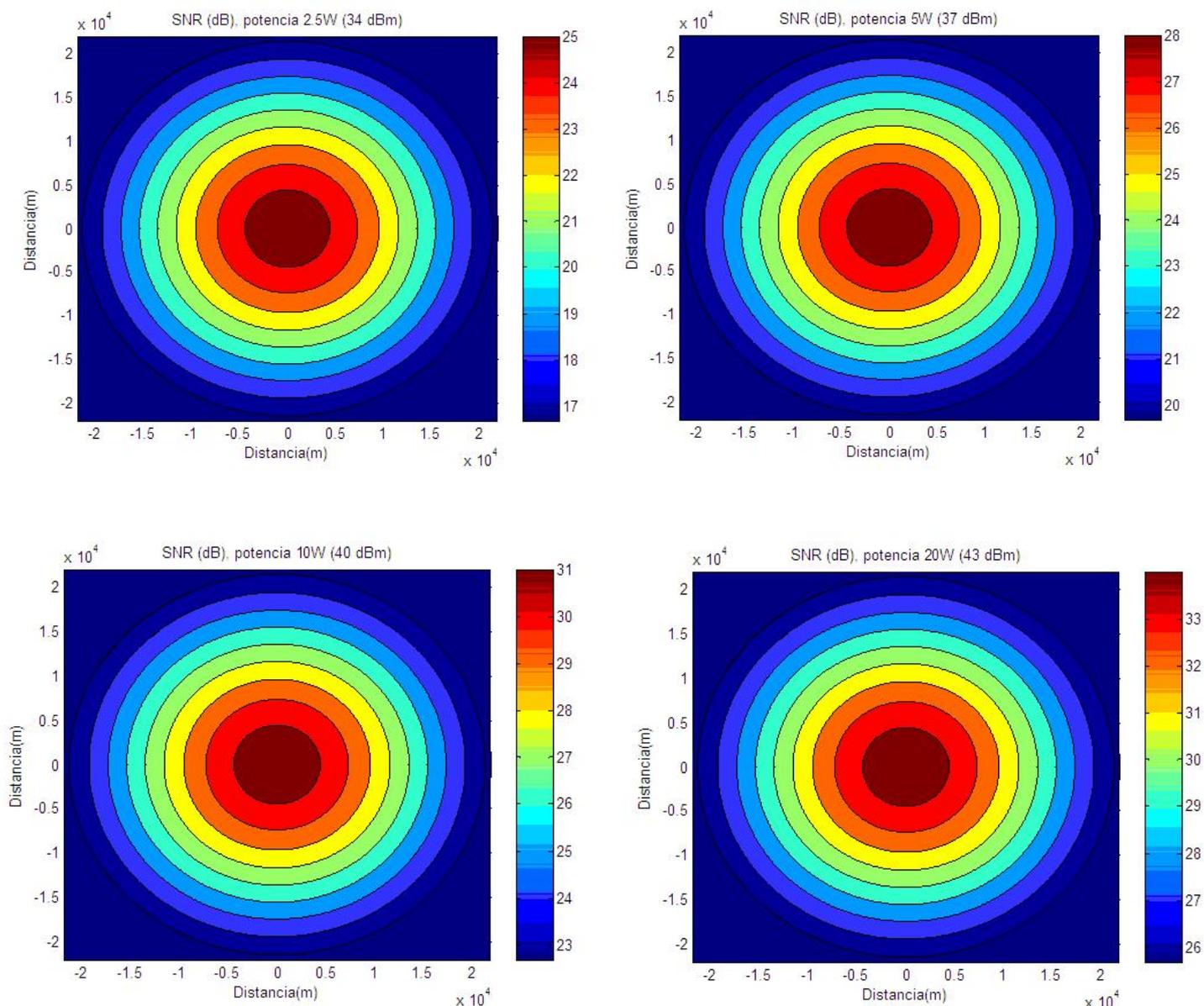
A lo largo del capítulo de difusión sobre DVB se han expuesto los diferentes factores teóricos que influyen en la comunicación. A continuación (Tabla 4) se exponen todos aquellos que han sido utilizados para realizar las simulaciones:

Característica	valor
Potencia transmitida (dBm)	variable
Pérdidas en el transmisor (dB)	4
Ganancia de antena transmisora (dBi)	Antena X-inverted
PIRE (dBm)	Ptx+Gtx variable
Ganancia por diversidad (dB)	0
Margen log-normal (dB)	0 (en esta simulación)
Pérdidas por lluvia y niebla (dB)	Despreciables
Pérdidas en recepción (dB)	4
Ganancia de antena receptora (dBi)	Antena X-inverted

**Tabla 4: Datos del balance general del sistema.**

Las cuatro siguientes gráficas que se muestran (figuras 15.1, 15.2, 15.3 y 15.4) muestran la SNR recibida en cada uno de los puntos del área de estudio.

Cada una de las figuras representa la relación señal a ruido recibida para una serie de potencias dadas. En este caso se han elegido cuatro potencias representativas de 2.5, 5, 10 y 20 Vatios (34, 37, 40 y 43dBm respectivamente).

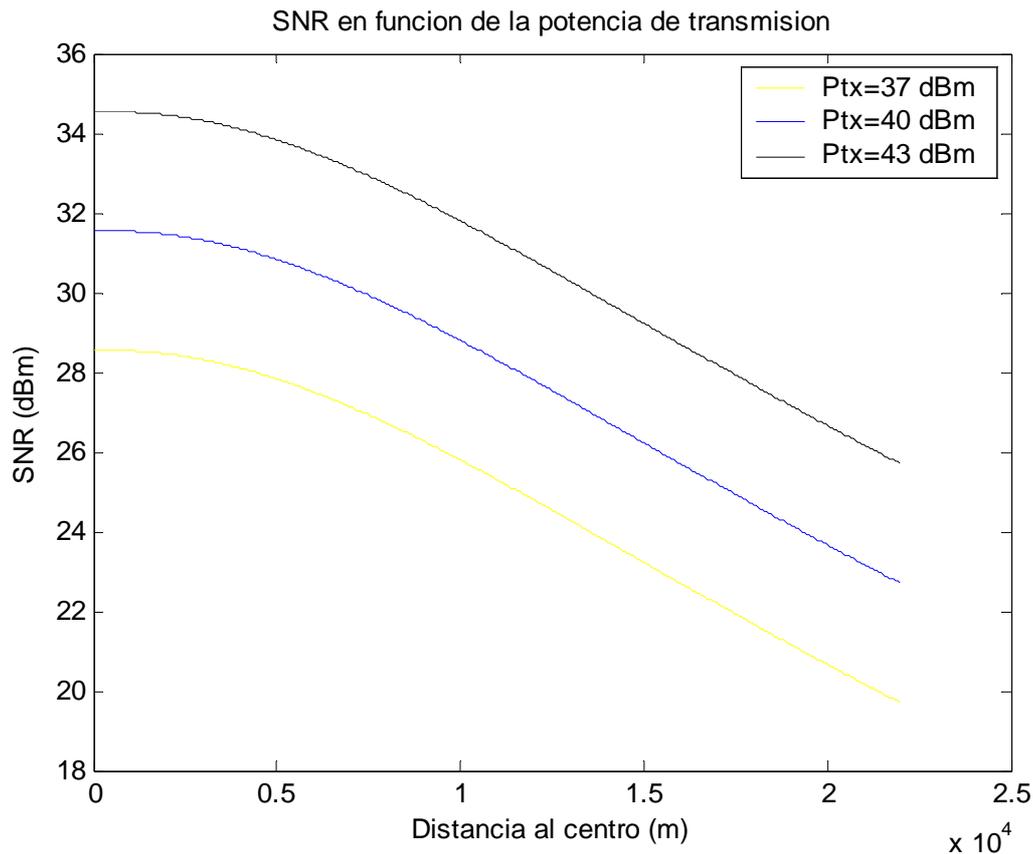


**Figura 15: SNR para potencia de transmisión de 2.5; 5; 10 y 20W.**

Según los gráficos obtenidos, es evidente que al aumento de la potencia de transmisión el sistema mejora en términos de relaciones de señal a ruido más alta. Esto proporciona por una parte, la capacidad de proporcionar mayores áreas de cobertura debido a la mejor calidad de la señal en los puntos más ajenos. Por otra parte se puede incrementar el régimen binario del sistema mediante el uso de modulaciones más potentes que requieren una mayor relación de señal a ruido que hemos obtenido con el aumento de potencia.

Centrados en el sistema de televisión digital en España, el estándar se encuentra configurado para una modulación OFDM 8k (ocho mil portadoras) y con una modulación de 64-QAM (cada una de ellas). Esto junto con la tasa de codificación de canal de 2/3, hace que el sistema requiera de una relación de señal a ruido de unos 20 dB. Según las gráficas obtenidas podríamos garantizar una recepción óptima para un radio de cobertura de 20 kilómetros con una potencia de transmisión de 5 Vatios. En caso de que se requiriese de una mayor zona de cobertura, se requeriría aumentar la potencia de transmisión hasta 10 Vatios para garantizar la integridad de la señal. Sin embargo en caso de tener limitada la potencia de transmisión a 2.5 Vatios, se podría optar por disminuir el área de cobertura a un radio de 15 kilómetros.

Con el objetivo de representar cuantitativamente el incremento de señal a ruido recibido producido por el aumento de la potencia de transmisión, se representa el perfil del dicho SNR en el área de cobertura. Al darse una simetría axial, en el eje de abscisas simplemente se representan las distancias al centro físico del sistema, el cual corresponde al punto terrestre sobre el que se encuentra el HAP. Dado que se busca otorgar un servicio de calidad, obviaremos la potencia de transmisión más baja de 2.5W (34 dBm), representando así las más viables:



**Figura 15: SNR para potencia de transmisión de 5; 10 y 20W.**

### Conclusiones de la 1ª simulación

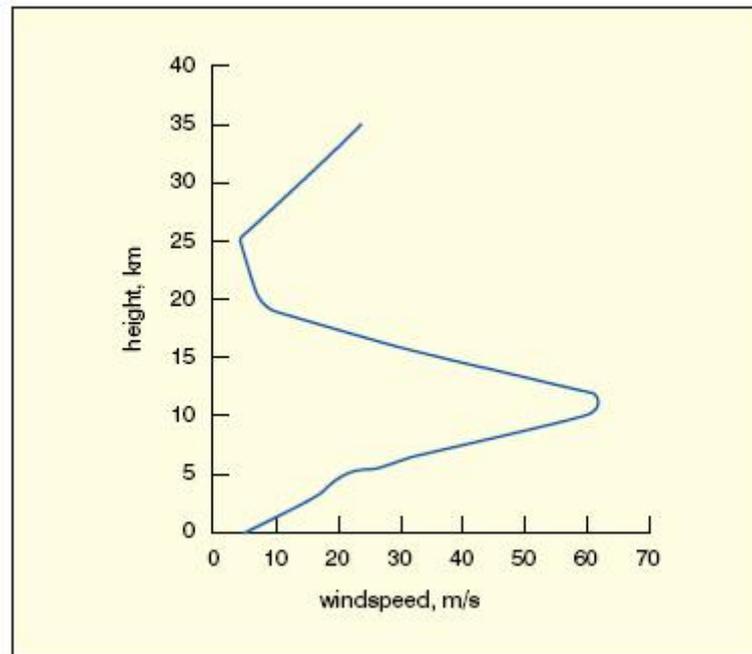
Como se ha introducido al principio de esta simulación, la potencia de transmisión y la eficiencia del sistema son dos parámetros fundamentales dentro de cualquier sistema de telecomunicación. En esta simulación se ha expuesto las diferentes calidades de señal proporcionadas por el mero hecho de aumentar las potencias de transmisión. Sin embargo dicha potencia y por tanto requerimiento energético no se obtiene de un modo simple. La necesidad de implantar mecanismos de autogeneración de energía como pantallas solares que sólo obtendrán energía durante el día, condicionan los gastos energéticos realizables. Por otra parte, la mejora de la señal con el incremento de potencia, nos proporcionará la capacidad de transmitir con una modulación más potente que permitirá mayores regimenes binarios con igual probabilidad de error. Además dicho aumento de potencia proporciona mayores áreas de cobertura para una señal a ruido fija. Es por tanto fundamental encontrar un balance entre calidad de señal y recursos utilizados. En las conclusiones finales de este

bloque se propondrán los valores que mejor se adapten a nuestro sistema manteniendo la compatibilidad con los receptores de los usuarios.

Según lo mencionado esta simulación será un factor importante en diversos aspectos como el dimensionado de la red, la potencia necesaria en la transmisión, la modulación, tiempos de guarda entre canales, codificaciones y demás parámetros con el objetivo de optimizar el sistema HAP.

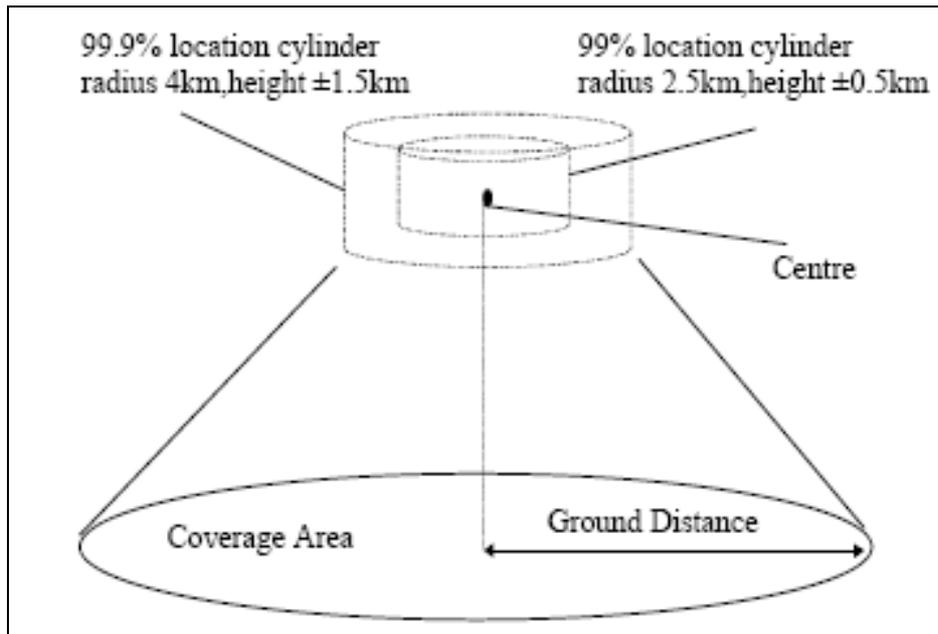
### **2.6.2 2ª Simulación: SNR vs ESTABILIDAD DEL HAP**

Tras haber analizado las características en términos de potencia, área de cobertura y las correspondientes modulaciones y aspectos de índole ingeniera, se procederá a estudiar cualidades estructurales del sistema. En primer lugar, hay que tener en cuenta que la plataforma no se encuentra fija a ninguna estructura y al permanecer en el interior del globo terráqueo las fuerzas gravitacionales actúan con la plataforma aeroespacial. Debido a este factor, el sistema se encuentra limitado por dos fenómenos físicos. Por una parte, la velocidad del viento provocará que la plataforma se desestabilice. Dicho movimiento vendrá dado por la velocidad del viento a la altura de la plataforma (aproximadamente 22 kilómetros). A continuación en la Figura 16 se muestra una aproximación simulada de la velocidad del viento en función de la altura:



**Figura 16: Velocidad del viento en función de la altura.**

Cómo puede ser apreciado en el gráfico, la velocidad del viento disminuye rápidamente a partir de los 12 kilómetros de altura, localizándose un mínimo relativo a una altura entre los 20 y 25 kilómetros. De esta forma y tal como se expone en la introducción del proyecto, este es un factor clave en la planificación inicial sobre localización de las plataformas. Teniendo en cuenta los mencionados resultados de la velocidad del viento según la altura, se podrá definir unos márgenes de movimiento del HAP variables que serán controlados por la propia plataforma. Según esto, tanto en el eje vertical (altura) como en el horizontal (posición relativa respecto al centro) la plataforma sufrirá unos balanceos y desvíos respecto a la posición inicial. Este fenómeno se expone a continuación con el siguiente gráfico (Figura 17) que representa al HAP y sus posibles variaciones:



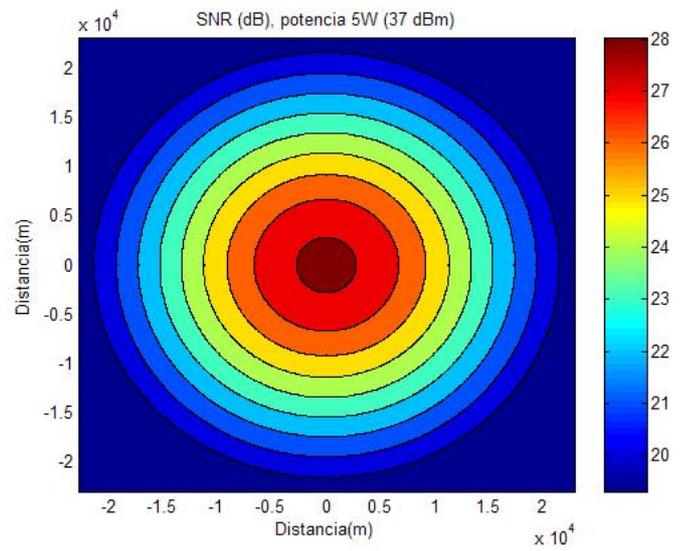
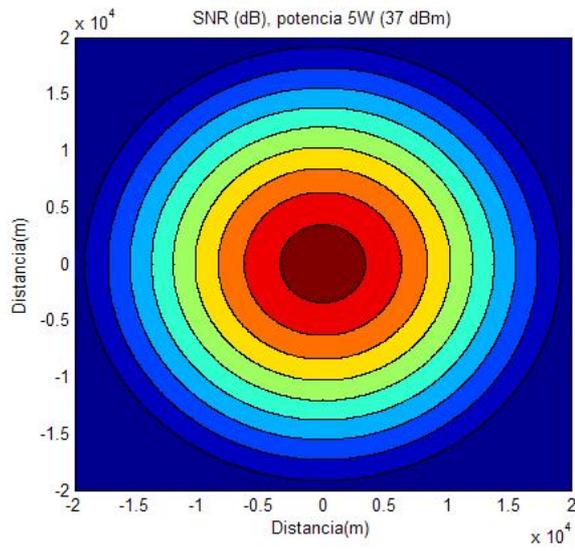
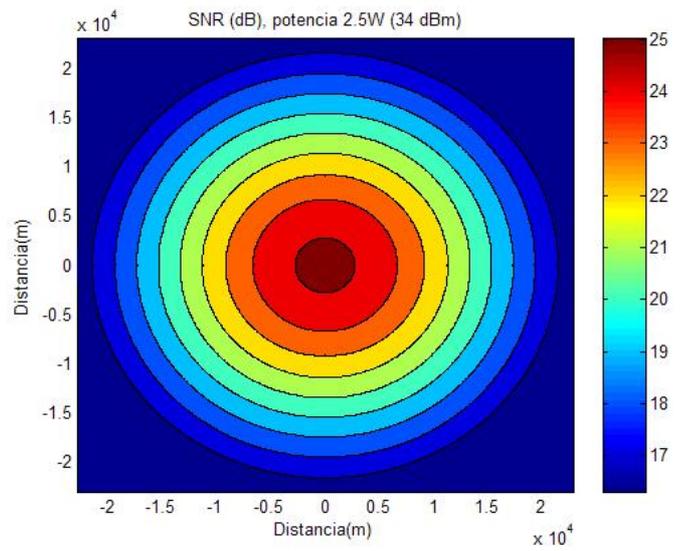
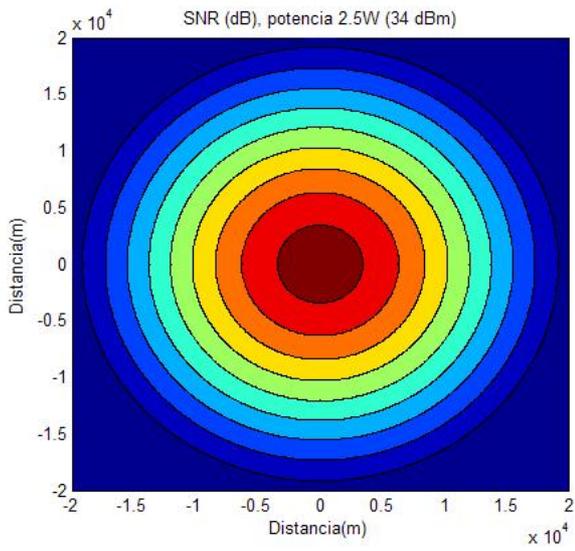
**Figura 17: Situación y posibles movimientos de la plataforma aérea**

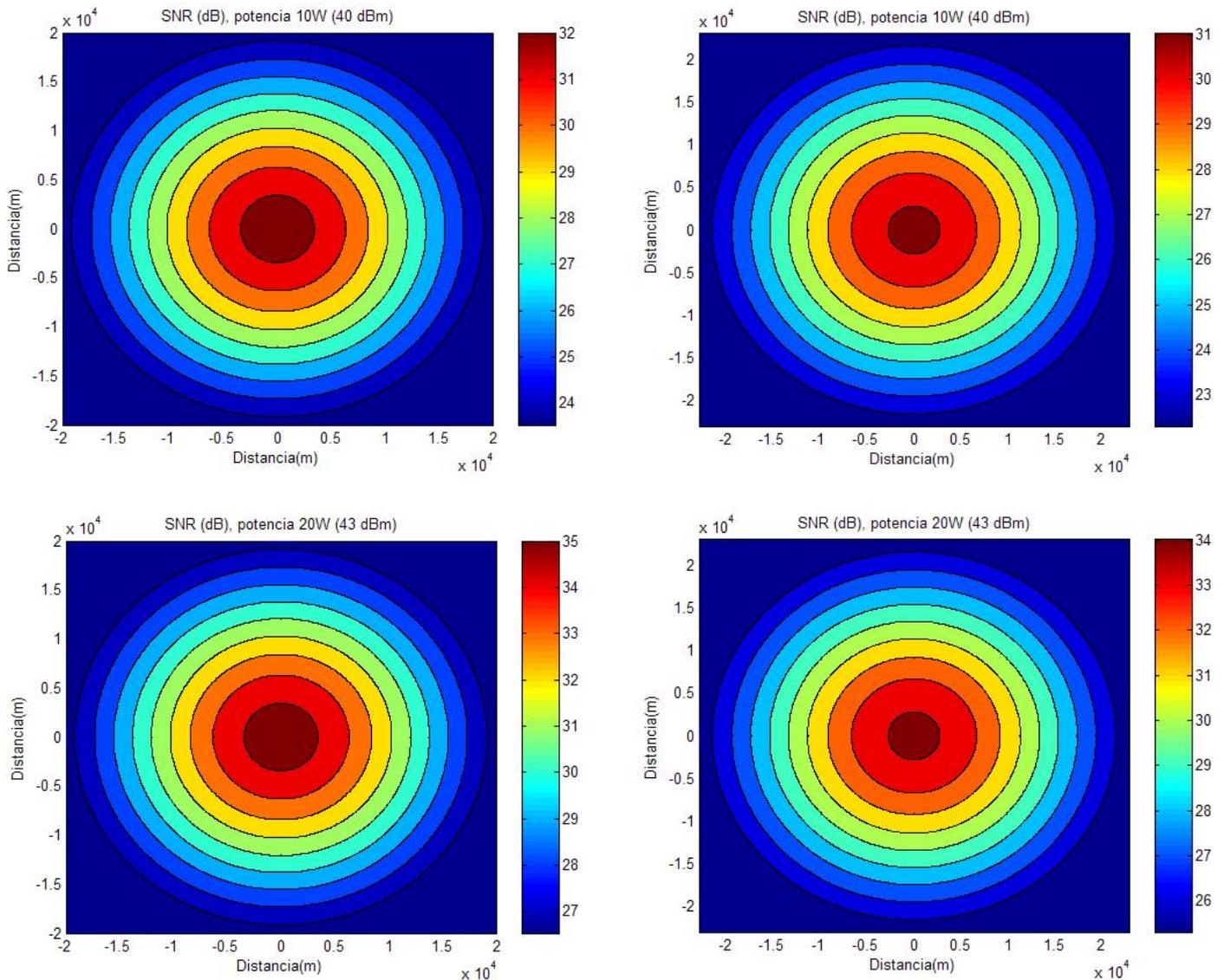
Por otra parte, el fenómeno de mantenimiento del HAP a una altura corresponde el reto más importante. Ello se debe a que las oscilaciones horizontales pueden ser controladas mediante GPS u otros métodos y el efecto que provocan es un desplazamiento de igual magnitud en el área de cobertura. Sin embargo la diferencia de altura que se pueden producir implicaría un cambio en potencias recibidas debido al aumento de la distancia entre el HAP y los receptores. Además las ganancias de las antenas sufrirán una variación debido al cambio del ángulo de incidencia. Por todo ello, la motivación de este estudio se concentrará en analizar los efectos que provocan las pérdidas y ganancias en la calidad de señal recibida. Además, al igual que en la simulación anterior, se mostrarán los mencionados efectos respecto a las diferentes potencias de transmisión.

Para la simulación, se ha decidido dar cuatro alturas representativas, en función de los posibles cambios de la misma. Por ello se representarán las áreas de cobertura para las distintas potencias de transmisión para unas alturas de HAP de 20000 y 23000 metros. Los graficas obtenidas provenientes de la ejecución del código de Matlab son las siguientes:

**ALTURA DEL HAP 20 Km**

**ALTURA DEL HAP 23 Km**





**Figura 18: SNRs con potencias de transmisión de 2,5; 5; 10 y 20 Vatios y altura de 20 y 23 km**

Al disminuir la altura de la plataforma, la distancia entre la antena transmisora y receptora disminuye. Esto implica una disminución de las pérdidas por espacio libre durante la propagación. Sin embargo, a medida que aumenta la altura de la plataforma existe una mayor ganancia por parte de las antenas X-inverted. Esto se debe a que a mayor altura del HAP el ángulo de incidencia es menor y por lo tanto en los extremos del área de cobertura el ángulo se ha reducido, aumentando pues la ganancia. La pérdida de señal es prácticamente constante en las tres potencias de transmisión y es igual a 1 decibelio.

### Conclusiones de la 2ª simulación

Como se ha visto en los gráficos y en conclusión a ambos fenómenos observados, a primera vista se discriminaría el aumento de la altura del HAP frente a su caída de altura. Sin embargo, hay que tener en cuenta que a menor altura, disminuiríamos la propiedad intrínseca de visión directa del sistema por lo que se requiere un estudio del desvanecimiento por sombras. Además la velocidad del viento es mayor a medida que disminuye la altura de la plataforma por lo que resulta indispensable un control exhaustivo de la misma.

En adición las plataformas no pueden interferir con los sistemas aéreos y deben de permanecer a una altura donde la velocidad del viento no origine importantes cambios en su posición.

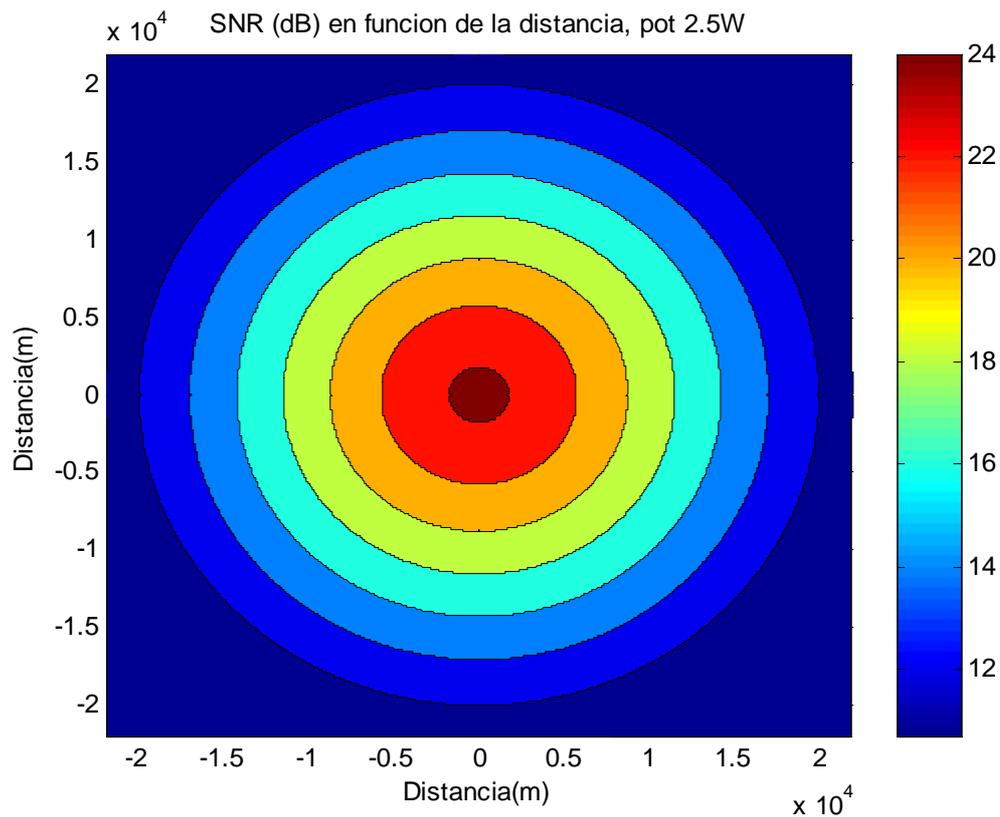
### **2.6.3 3ª Simulación: MÁRGENES POR SOMBRA**

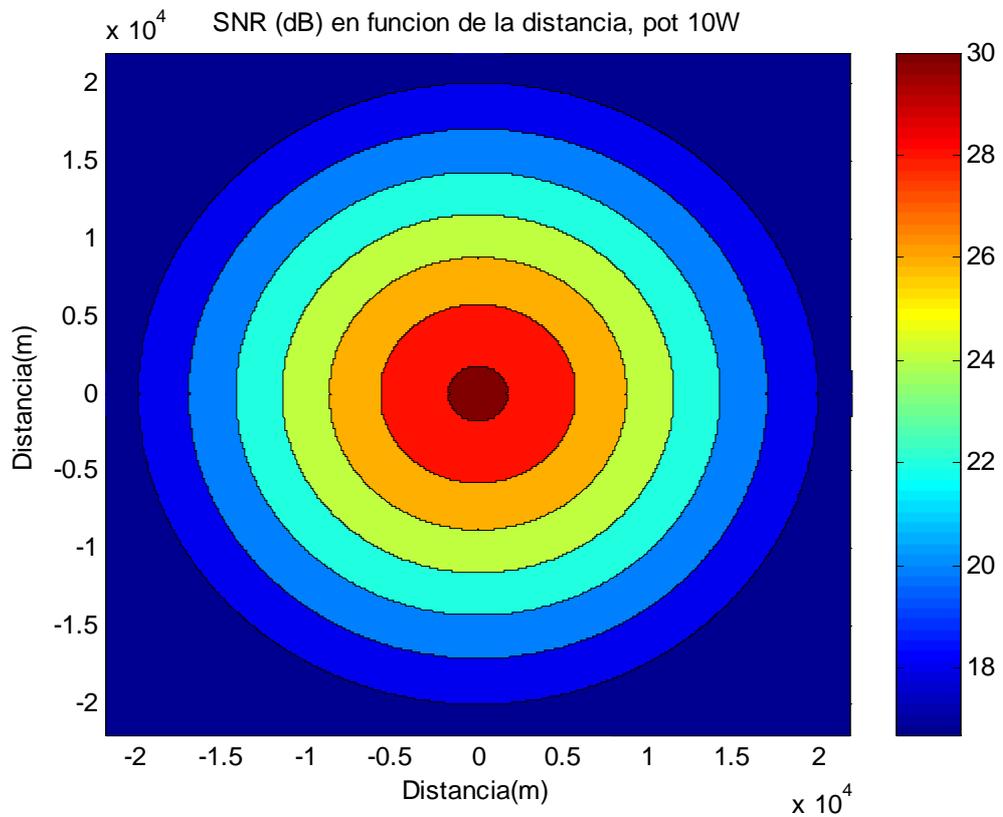
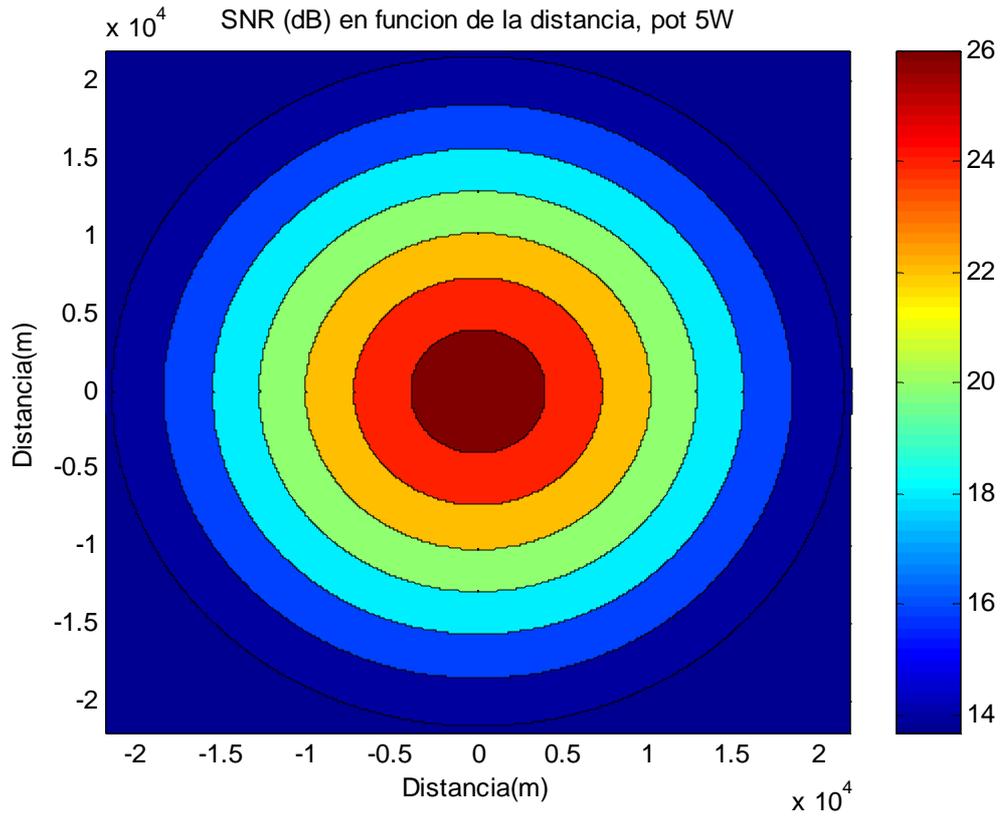
En la mayoría de los sistemas de telecomunicación se suele buscar una conexión directa entre el emisor y el transmisor. Más específicamente, en los sistemas con medios de propagación por el espacio se habla de visión o no visión directa (LOS y NLOS respectivamente). Este es un factor clave que delimita el área de cobertura de los diferentes sistemas. En relación con esto, por ejemplo, un sistema de comunicaciones de telefonía móvil requiere de pequeñas áreas de cobertura para dar servicio a los usuarios que reciben la señal con un factor importante de multitrayecto (sistema NLOS).

Inicialmente y debido a la propia arquitectura física de los sistemas HAPs, se ha supuesto una comunicación de visión directa en las simulaciones previas. Sin embargo, considerar que en grandes ciudades como puede ser Madrid la comunicación no vaya a estar interferida por algún obstáculo puede acarrear errores. En algunos casos, la presencia de edificios de gran altura o la propia imposibilidad de colocar la antena receptora en un lugar óptimo, dan lugar a tener en consideración factores como el margen por sombra y multitrayecto. Por otra parte, al considerar una comunicación cuasi visión directa, los efectos por multitrayecto pueden ser despreciados. Sin embargo, el efecto del margen por sombra de edificios o demás obstáculos debe ser un factor a considerar. Además dicho efecto será más apreciable a medida que se traslade el centro físico del sistema hacia los

extremos del área de cobertura. Esto es debido al propio fenómeno de la sombra y viene caracterizado en el programa Matlab mediante la expresión anteriormente comentada:

$$L_p(dB) = 10 \cdot \left( \frac{\alpha}{90} \right) + 1 \quad \text{Ecuación 6.}$$





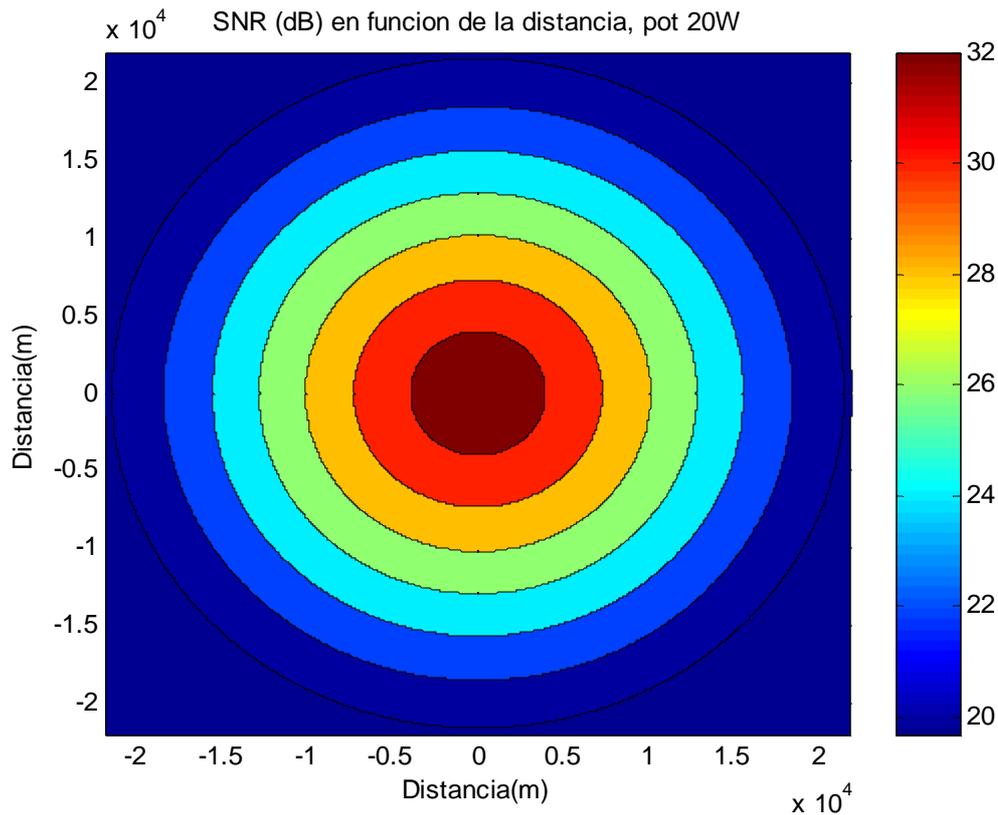


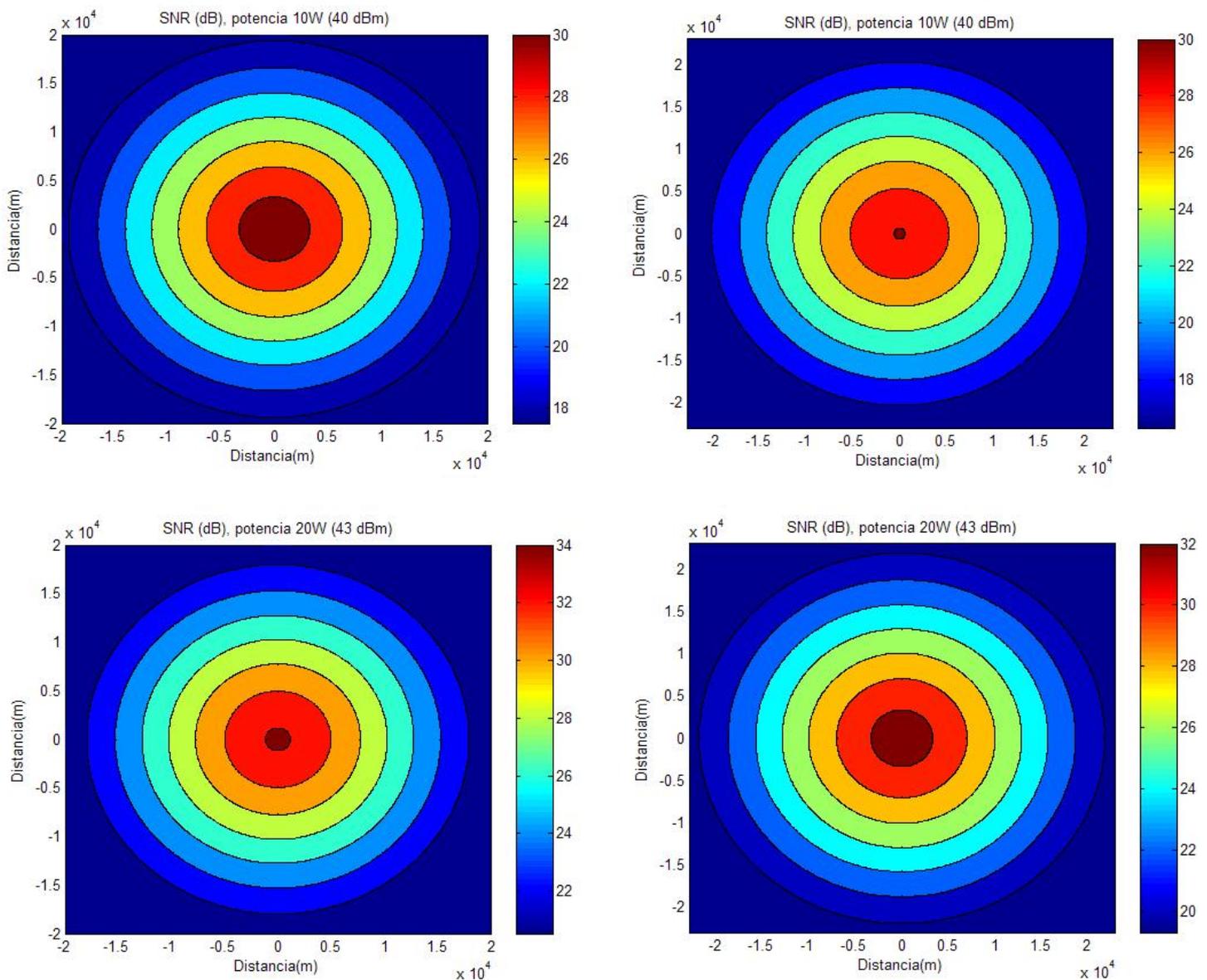
Figura 19: SNRs para potencias de transmisión de 2,5 5 10 y 20 W, con margen por sombras.

En los resultados obtenidos se observa una disminución considerable en las calidades de la señal recibida respecto al caso sin márgenes por sombra. En este sentido, cabe destacar que la potencia de transmisión de 2.5 Vatios representa una opción poco viable para otorgar el servicio. Según esto y como por otra parte resulta evidente, la potencia de transmisión de 20 Vatios representa la mejor opción en términos de calidad de señal y robustez frente al desvanecimiento por sombra.

Sin embargo en los cálculos anteriores no se ha tenido en consideración los efectos de los posibles movimientos del HAP. Como se dedujo de la anterior simulación dicho fenómeno produce una disminución de la relación señal a ruido obtenida. A modo de ilustrar cuantitativamente su efecto añadido en el estudio del desvanecimiento por sombra se realizarán simulaciones para las dos potencias de transmisión más elevadas (10 y 20 Vatios).

**ALTURA DEL HAP 20 Km**

**ALTURA DEL HAP 23 Km**



**Figura 20: Comparativa de las diferentes SNRs para potencias de transmisión de 10 y 20 Vatios con márgenes por sombra para las alturas de 20 y 23 kilómetros.**

Analizando los resultados se confirman la tendencia marcada al final de la segunda simulación. En ella, cuando la altura del HAP es menor disminuyen las pérdidas por propagación lo que produce que las SNR recibidas sea mayor. Sin embargo, en esta ocasión debido a que la plataforma está a menor altura, la señal llega a los puntos receptores con un ángulo mayor que produce más pérdidas por sombras. Aún con esto, el sistema a 20 kilómetros de altura proporciona una mejor calidad de señal.

### Conclusiones de la 3ª simulación

En esta simulación se ha realizado una comprobación de la viabilidad del sistema teniendo en cuenta los márgenes por sombra. En ella, se ha constatado que el decremento de altura, implica la aplicación de unos mayores márgenes por sombra mayores. En el terreno práctico, para el requerimiento más alto de SNR en función de la modulación y la codificación obtendremos que la opción más viable resulta con una potencia de transmisión de 20 Vatios (43 dBm).

#### **2.6.4 4ª Simulación: ENLACE ASCENDENTE**

Para el enlace ascendente (uplink) se ha utilizado una frecuencia de simulación de 0.7 GHz. Las antenas utilizadas de alta ganancia y distintos parámetros en caso de ser el enlace en tierra o el HAP ya han sido definidas en el apartado de características técnicas del sistema. Como resumen, se define para la antena de tierra una antena con un ancho de haz de  $25^{\circ} \times 25^{\circ}$  a 3dB y una ganancia de 16.5 dB. En el otro extremo de la comunicación, en el HAP, se utilizará una antena con un ancho de haz de  $35^{\circ} \times 35^{\circ}$  a 3dB con una ganancia de 13 dB. En el caso de este enlace, se tienen en cuenta unas pérdidas de alimentación en antenas de 4 dB.

A continuación, en la Figura 21, se muestra una gráfica con las posibles potencias de transmisión en la estación base terrenal y su correspondiente potencia de recepción en el HAP:

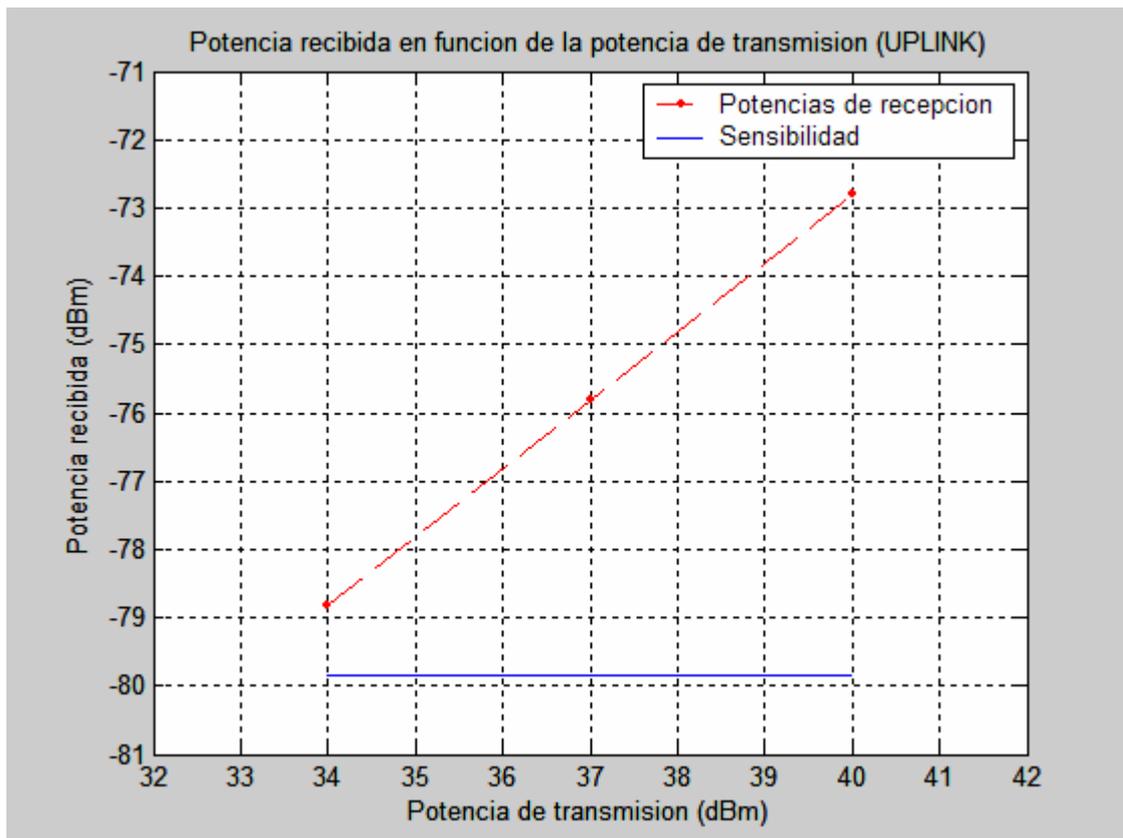


Figura 21: Potencia recibida en función de la transmitida (enlace ascendente).

Como se puede distinguir claramente todas las potencias simuladas (2.5 ,5 y 10 W) son suficientes para alcanzar la potencia mínima necesaria. En adición a lo mencionado cabe destacar que la mencionada potencia de transmisión no es un elemento crítico debido a que en tierra tenemos una gran capacidad de suministro energético para alimentar las antenas de transmisión en el enlace ascendente. Esto se debe a que al estar el emisor en tierra firme, la potencia que se puede suministrar es mucho mayor que en el caso de que el emisor sea el HAP. Como consecuencia de dichos comentarios, observamos que para una potencia de transmisión de 37 dBm (5 W) la señal es fácilmente reconocible, superando ampliamente los umbrales y dando al sistema una mayor robustez debido a los márgenes extra que se pueden aplicar.

### Conclusiones de la 4ª simulación

Finalizando este último apartado de conclusiones individuales, el enlace ascendente no supone una parte crítica en el marco del desarrollo del sistema HAP para difundir las señales de televisión. Por otra parte y ligado con las simulaciones anteriores cabe destacar la necesidad de mantener estable la posición del HAP ya que las antenas utilizadas para este enlaces son directivas. Esto conlleva a que un desplazamiento del HAP supondría tener una antena móvil en la estación terrenal y unas pérdidas en las ganancias de la antena receptora del HAP que es fija.

## **2.7 Análisis de las simulaciones**

Antes de involucrarse en la explicación de las simulaciones, cabe reseñar el hecho de que el orden de las mismas ha ido surgiendo según las necesidades del sistema. Cuando se inicia con la relación señal a ruido recibido en función de la potencia, se están considerando los principales y más fundamentales factores dentro de un sistema de telecomunicación (sensibilidad, pérdidas por propagación, características técnicas de los elementos...). Sin embargo a la hora de realizar el estudio, surge la necesidad de tener en consideración las características estructurales físicas e intrínsecas al sistema HAP. En este sentido, los cambios de altura y el margen por desvanecimientos, otorgan al sistema un mayor realismo con las aplicaciones prácticas del mismo. En este sentido el análisis que se va a realizar estará basado en esta última simulación que engloba las simulaciones conjuntamente.

Al analizar la simulación del sistema con dichas variaciones de potencia, altura del HAP y teniendo en cuenta el margen de desvanecimiento se pueden extraer diversas conclusiones:

- El incremento de altura del HAP es más crítico que la caída de la misma en términos de SNR teniendo en cuenta las pérdidas por espacio libre, ganancias de las antenas y márgenes de desvanecimiento por sombra. Además la altura límite inferior se encuentra condicionada por la propia posibilidad de localizar el sistema a dicha altura, la velocidad del viento en relación a la misma y las pérdidas por desvanecimiento por sombra.

- La potencia de transmisión del sistema debe ser lo más alta posible. Con objetivo de proporcionar un servicio de calidad con la más potente modulación y régimen de transmisión binaria y con la menor tasa de codificación es necesario obtener una SNR de al menos 24 dB. En este proyecto y deseándose cubrir un área cobertura de 20 kilómetros considerando desviaciones de altura y desvanecimiento la potencia de transmisión más idónea es 20 Vatios o mayores. Para obtener un régimen binario, modulación y codificación similares a los del estándar DVB-T bastaría una potencia de transmisión de 10 Vatios.
- En el bucle de sentido ascendente el estudio en términos de propagación de la señal viene facilitado con el uso de antenas más potentes y directivas que tienen una mayor ganancia. Por ello, dicho enlace no supone un factor crítico dentro del estudio de viabilidad técnica

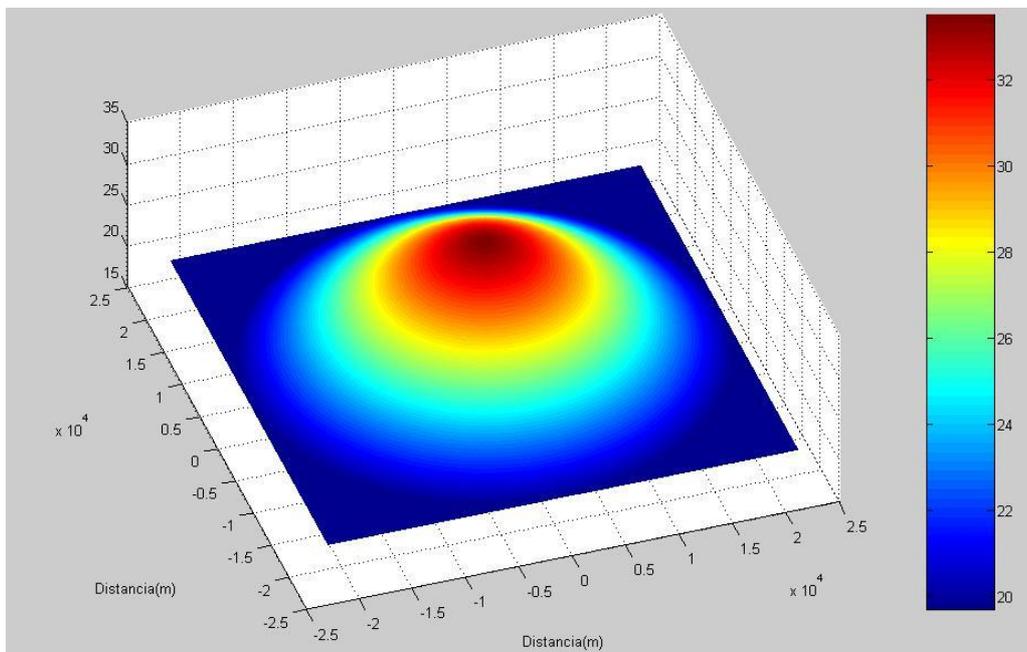
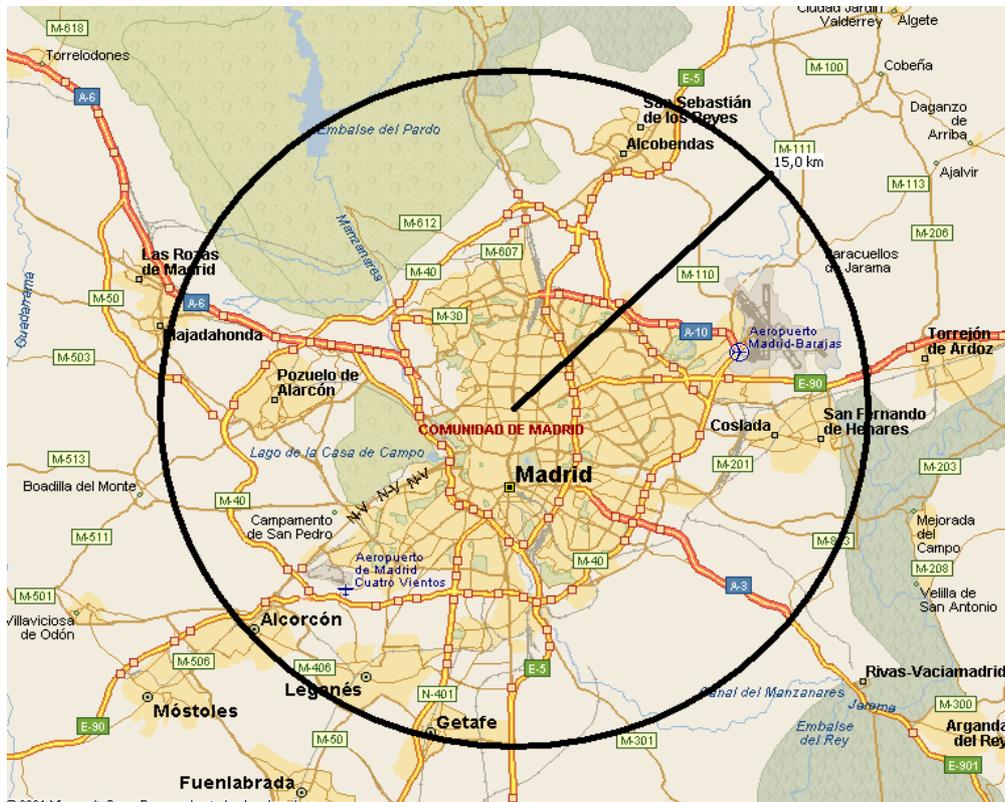
## **2.8 Conclusiones**

A lo largo de este bloque ha quedado evidenciado que el servicio de difusión de televisión digital sobre HAPs resulta una opción viable, especialmente en lugares de difícil acceso donde no existen las infraestructuras adecuadas. Además su rápido despliegue constará básicamente en su lanzamiento, despliegue de antenas receptoras y una única conexión ascendente de información, por lo que es un sistema sencillo y potente.

En términos de calidad de la señal el sistema ofrece unas amplias prestaciones y con amplias garantías de correcto funcionamiento, integrando unos amplios márgenes de calidad. Para conseguir las tasas convencionales de televisión digital bastaría con una potencia de transmisión de 10 Vatios. Sin embargo, aumentando dicho valor hasta los 20 Vatios se lograría una gran mejora en la SNR con unos márgenes superiores que hagan más robusto al sistema frente a posibles desvanecimientos.

A continuación se muestra el área de cobertura aproximada para el sistema aplicado en el hipotético caso de despliegue en la ciudad de Madrid. Acto seguido se representa en

un gráfico 3D la SNR que se recibiría en los distintos puntos de la ciudad teniendo en cuenta que el radio marcado son 15 kilómetros. Todo ello queda expuesto en la Figura 22:



**Figura 22: Mapa de Madrid y Área de cobertura del mapa para potencia de transmisión 20 Vatios con márgenes por sombra.**

### **3 CAPÍTULO 3: WiMAX DESDE HAPs**

---

Una vez estudiado la difusión de la señal de televisión, es el momento de proceder con una comunicación con mayor potencial e interactiva tal y como demanda el nuevo mercado. Dentro de este marco, el principal y más potente medio de información actual es Internet. Inicialmente dicho servicio ha sido proporcionado a través de los cables de telefonía conmutada que llegan hasta los hogares. En este sentido, la antigüedad de las redes desplegadas y el tipo de medio por el que se transmiten las señales han sido los principales factores limitantes de dicha tecnología. Con el tiempo, se ha logrado obtener altas tasas binarias mediante el despliegue de nuevos nodos y modulaciones más potentes. Sin embargo, en la actualidad dicha tecnología se encuentra en los límites físicos de su capacidad por lo que no se contemplan evoluciones importantes sobre la misma. Otros sistemas como el acceso a Internet por cable han tenido un desarrollo muy desigual según los diferentes países. Dicha red se basa en la implantación de una tecnología mucho más potente que el par de cobre (fibra óptica y cable coaxial) para obtener los grandes anchos de banda requeridos. Sin embargo, la mejora de dicha tecnología se ha visto mermada por los altos costes de despliegues de la red de fibra óptica en las grandes ciudades. Por otra parte el hecho de llevar fibra óptica a otros lugares más despoblados no supone una opción viable ya que los altos costes de su despliegue difícilmente serían subsanados con el tráfico generado.

Al margen de las distintas tecnologías de acceso a la red metropolitana, se han ido desarrollando las tecnologías de redes LAN (Redes de área local) que conectaban a los usuarios con las reden MAN (Redes de área metropolitana). El objetivo ha consistido en ofrecer nuevos servicios o comodidades a los usuarios introduciendo mejoras que no supusiesen unos costes tan elevados como el de restaurar toda la tecnología de la red MAN. Así por ejemplo, surgió el estándar 802.11 conocido con las siglas WiFi (Wireless Fidelity) el cual otorgaba una cierta movilidad a los usuarios al evitar los cables para la conexión de la interfaz de red del ordenador al router. El éxito de dicha tecnología ha sido espectacular, debido en gran medida a la proliferación de los ordenadores portátiles y a nuevos y pequeños dispositivos que la utilizan para conectarse a una red de área local. Sin embargo, dicha tecnología de acceso inalámbrica se encuentra directamente limitada por la

red metropolitana (usualmente tecnologías DSL) por lo que su aplicación sólo supone una comodidad extra para el usuario pero en gran parte muy limitada.

En este sentido, el aumento de la demanda de información por parte de los usuarios, ha incrementado las tasas binarias necesarias para poder responder al mercado. La búsqueda de las redes de comunicaciones de banda ancha económicas es la prioridad absoluta para una red metropolitana potente. Dentro de banda ancha definiremos todos aquellos sistemas que ocupen un cierto ancho de banda elevado y otorguen unos elevados regímenes binarios.

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado nace WiMAX (World Wide Interoperability for Microwave Access) como una solución relativamente económica al despliegue de una red de banda ancha. El objetivo es crear una red metropolitana con una gran capacidad de ancho de banda y que además sea inalámbrica.

A continuación se procederá a realizar una introducción sobre dicha tecnología y a la explicación de sus principales características tecnológicas.

### **3.1 Historia de WiMAX**

WiMAX al igual que los estándares DVB y WiFi, se encuentra organizada por un consorcio llamado WiMAX Forum. Dicha corporación no tiene ánimo de lucro y su principal objetivo promover y certificar los productos de los distintos fabricantes para garantizar su interoperatividad. Sus dos principales miembros son Nokia e Intel. Anteriormente al estándar WiMAX (802.16-2004) se encontraban las tecnologías preWiMAX. Los fabricantes determinaban y configuraban su propio producto de modo que la interoperatividad entre ellos era prácticamente nula. Dentro de WiMAX y a lo largo del tiempo se han creado principalmente cuatro estándares (Tabla 5) definidos tecnológicamente a continuación:

Estándar	IEEE 802.16	IEEE 802.16a	IEEE 802.16-2004 (802.16d)	IEEE 802.16e
Fecha de aprobación	Diciembre del 2001	Enero del 2003	Junio del 2004	Diciembre del 2005
Rango de frecuencias (GHz)	10-66	2-11	2-11	2-11 (fijo) 2-6 (móvil)
Tipo de sistema	Punto a multipunto (mallado)	Punto a multipunto (mallado)	Punto a multipunto (mallado)	Punto a multipunto (mallado)
Esquema de modulación	Portadora única	Portadora única, de 256 o 2048 OFDM	Portadora única, de 256 o 2048 OFDM	Portadora única, de 128, 256, 512, 1024, 2048 OFDM
Multiplexación	TDM/TDMA	TDM/TDMA, OFDMA	TDM/TDMA, OFDMA	TDM/TDMA, OFDMA
Modulación	QPSK, 16 ó 64-QAM	QPSK, 16 ó 64 QAM	QPSK, 16 ó 64 QAM	QPSK, 16 ó 64 QAM
Ancho de banda del canal (MHz)	20, 25 y 28	Seleccionable 1.25-20	Seleccionable 1.25-20	Seleccionable 1.25-20
Tasas binarias (Mbps)	32-134,4	1-75	1-75	1-75
	LoS (fijo)	NLoS (fijo)	LoS y NLoS (fijo)	NLoS (móvil)

**Tabla 5: Características de los distintos protocolos WiMAX.**

Paralelamente a dichos estándares se creó el HiperMAN generado por la ETSI. Sus características y objetivos eran similares al estándar internacional centrándose en la banda de 3.5 GHz. Se encuentra optimizado para la conmutación de paquetes y aplicaciones tanto fijas como móviles. En el año 2004 con la estandarización de ese año se consigue la completa interoperatividad de sistemas con el estándar internacional.

Por otra parte el sistema WiBro (Wireless Broadband) es un servicio portátil basado en el estándar 802.16e que se está desarrollando en Corea del Sur. En este país ya existen terminales que permiten ver la televisión o navegar por Internet mediante una tecnología muy similar a WiMAX móvil. El sistema esta albergado en la banda de 2,3 GHz y sus capas física y de acceso son similares a las de WiMAX. Actualmente WiMAX Forum trata de conseguir interoperabilidad total entre ambos sistemas.

### **3.2 Introducción**

Una vez analizada la trayectoria de WiMAX a lo largo de los años, se va a proceder a caracterizar los aspectos tecnológicos más importantes. En primer lugar cabe destacar que al ser una tecnología inalámbrica su recurso crítico se encuentra en el espectro utilizado. Algunos países, reservaron años atrás un espectro para las tecnologías de futuro acceso inalámbrico. Sin embargo los sistemas preWiMAX (antes de la estandarización) se diseñaron principalmente para trabajar en las bandas no estandarizadas. Por lo general, el problema principal de dichas bandas es que se caracterizan por frecuencias elevadas, lo que produce unas mayores pérdidas por diversos factores (propagación, lluvia, niebla). Además el hecho de utilizar frecuencias más elevadas implica una mayor interferencia entre sistema y mayor complejidad de los elementos en transmisión y en recepción (filtrados y ecualizadores más complejos), con su correspondiente aumento de costes.

#### Características de un sistema WiMAX

Como es apreciable en los datos temporales que se proporcionan anteriormente, la tecnología WiMAX es una tecnología realmente novedosa. Sus dos principales ventajas es su gran capacidad de información y la ventaja del despliegue inalámbrico. Sin embargo debido a que se trata de una tecnología reciente, sus características son mucho más completas y tratan de ajustarse al requerimiento actual tecnológico. Algunos de sus prestaciones más importantes son:

- Grandes distancias de cobertura (hasta 50 kilómetros)
- Gran ancho de banda (equivalente a cientos de DSL)
- Sistema escalable con gran optimización de la capacidad
- Estructura de mallas y antenas inteligentes

- Criterios de calidad de servicio (Best Effort o Premium)
- Gran estandarización y compatibilidad
- Seguridad y encriptación: Con ello se consigue otorgar alta privacidad al usuario.
- Ancho de banda reservado y capacidad de usar los no reservados.
- Modulación, ecualización y codificación adaptable: Permiten hacer lo más eficiente posible el medio. Adaptándose a las condiciones del medio y a la propia del sistema se obtendrán las mayores tasas de transmisión posibles para cada situación
- Potencia de transmisión adaptable con control automático de la potencia: Permite minimizar la interferencia entre células
- Control de errores.- Utiliza la solicitud automática de transmisión ARQ. Se obtiene un alto rendimiento extremo a extremo.
- Servicio con criterios de calidad (QoS).- Debido a las anteriores propiedades ofrece una baja latencia para servicios que lo necesitan como VoIp y video sobre IP. Reconoce y otorga prioridades.
- Es escalable al número de usuarios conectados lo que permitirá una buena eficiencia en costes del sistema

### Introducción a la modulación

Dentro de los sistemas WiMAX se ha tenido una cierta evolución en lo que a la modulación utilizada se refiere. En un principio, los sistemas preWiMAX utilizaban modulaciones similares a GSM con modulaciones FDM y TDM combinadas. Sin embargo dichas modulaciones fueron dejadas atrás por la modulación OFDM. Tal y como se ha visto en el bloque de televisión digital el hecho de dividir el ancho de banda en subcanales provoca una menor distorsión de la señal. Por ello y para poder otorgar una comunicación interactiva, escalable a las condiciones de una manera más eficaz se decidió implementar el acceso múltiple por división ortogonal de frecuencia (OFDMA). Con dicho sistema se pueden obtener las mencionadas características en relación con el término anteriormente comentado 'adaptable'.

### Modulación OFDM y acceso OFDMA

La modulación y metodología de acceso OFDMA consiste en dividir el ancho de banda disponible en subcanales (al igual que OFDM) agrupando un subconjunto de

portadoras en subcanales. En el acceso múltiple se otorgan una o varias portadoras a cada usuario en función de lo que se desee. De esta forma, se facilita la organización de las subportadoras para poder lograr un reparto de los recursos entre los usuarios más eficientemente.

Por otra parte ya el protocolo 802.16.e incluye SOFDMA (Escalable OFDMA) el cual consiste en una asignación de recursos (anchos de banda o portadoras) en función del estado de ocupación del sistema o de preferencias propias.

### Características

Al tener tantas similitudes con la modulación OFDM no se realizarán grandes explicaciones si no que se comentará los datos más característicos de OFDM para WiMAX.

- OFDM de 256 a 2048 portadoras moduladas en QPSK, 16-QAM o 64-QAM
- El acceso múltiple OFDMA normalmente posee 2048 portadoras

A continuación en la Tabla 6 se muestra una tabla con los valores más representativos para el caso de una OFDMA de 2048 portadoras tanto para el enlace ascendente como el descendente:

Característica	Enlace descendente	Enlace ascendente
Número de portadoras	2048	2048
Portadoras útiles	1702	1696
Número de subcanales (OFDMA)	32	32
Portadoras por subcanal	48	53(5 para piloto)
Portadoras de datos	1536	1536
Portadoras piloto	166	160
Portadoras de guarda	173 ó 172	176 ó 175

**Tabla 6: Características para un sistema OFDMA de 2k.**

Por otra parte el ancho de banda del canal variable dividido principalmente en 2 tipos en función de las bandas de frecuencia que se estén utilizando:

- Bandas sin licencia (2.5 y 5 GHz).-  $B_{\text{canal}} = 10$  y  $20$  MHz
- Bandas con licencia(3.5 GHz).-  $B_{\text{canal}} =$  múltiplo de 1.25 de 1.5 o 1.75 MHz = 1.25 , 3.5, 7, 8.75, 14, 17.5y 28 MHz son los más habituales.

Más adelante se dedicará un apartado exclusivamente al estudio de la banda de frecuencia para profundizar en la elección de la misma. Además también son tenidas en consideración durante el apartado económico debido a las diferencias entre las distintas elecciones posibles.

En la Figura 23 se muestra el diagrama de bloques del sistema y en la Figura 24 el esquema de la señal a la salida del modulador.

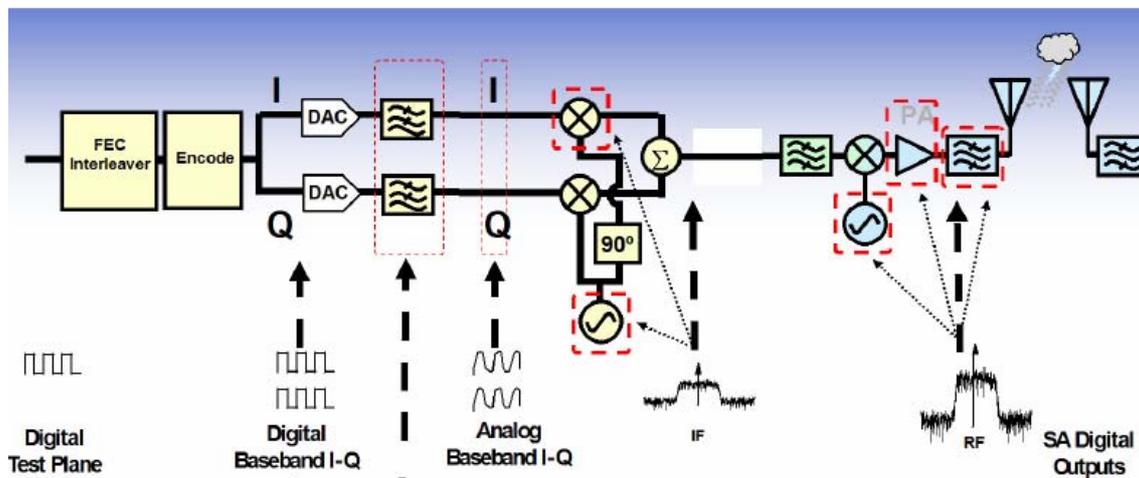


Figura 23: Diagrama de bloques de un modulador WiMAX.

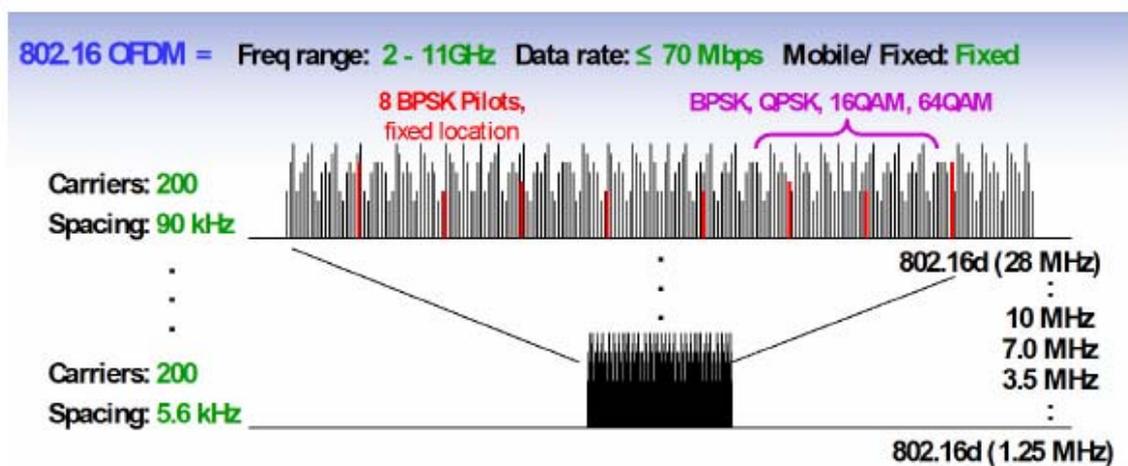


Figura 24: Espectro de una modulación OFDM.

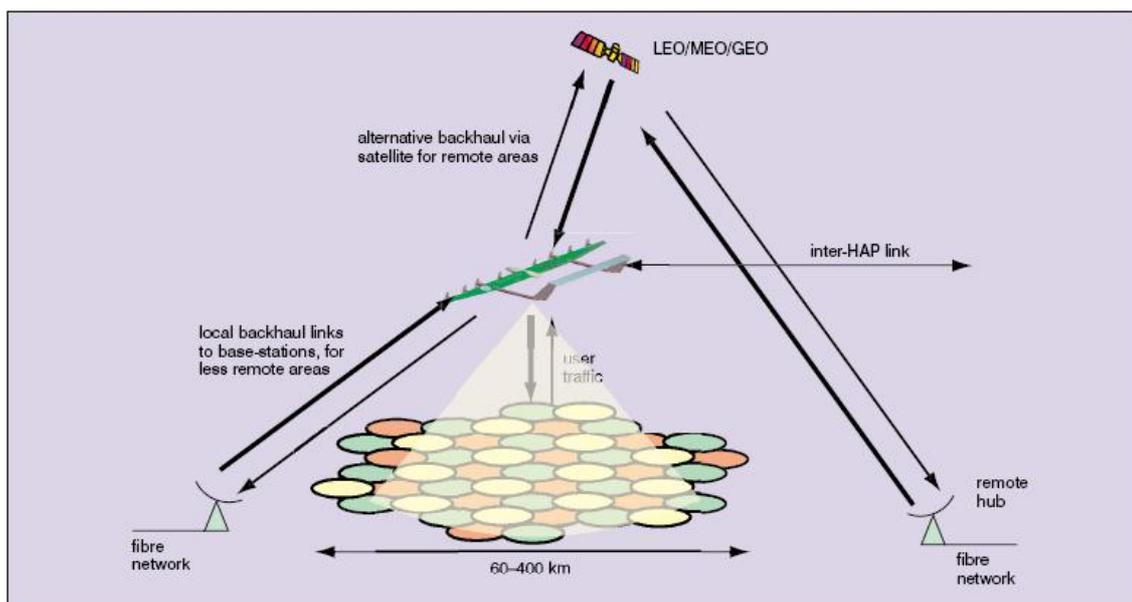
Por último y a modo de otorgar una visión global sobre las distintas tecnologías inalámbricas se ofrece una tabla comparativa (Tabla 7) técnica de WiMAX con las más importantes competidores:

Parameter	Fixed WiMAX	Mobile WIMAX	HSPA	1x EV-DO Rev A	Wi-Fi
Standards	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	3GPP Release 6	3GPP2	IEEE 802.11a/g/n
Peak down link data rate	9.4Mbps in 3.5MHz with 3:1 DL-to-UL ratio TDD; 6.1Mbps with 1:1	46Mbps <sup>a</sup> with 3:1 DL- to-UL ratio TDD; 32Mbps with 1:1	14.4Mbps using all 15 codes; 7.2Mbps with 10 codes	3.1Mbps; Rev. B will support 4.9Mbps	54 Mbps <sup>b</sup> shared using 802.11a/g; more than 100Mbps peak layer 2 throughput using 802.11n
Peak uplink data rate	3.3Mbps in 3.5MHz using 3:1 DL-to-UL ratio; 6.5Mbps with 1:1	7Mbps in 10MHz using 3:1 DL-to-UL ratio; 4Mbps using 1:1	1.4Mbps initially; 5.8Mbps later	1.8Mbps	
Bandwidth	3.5MHz and 7MHz in 3.5GHz band; 10MHz in 5.8GHz band	3.5MHz, 7MHz, 5MHz, 10MHz, and 8.75MHz initially	5MHz	1.25MHz	20MHz for 802.11a/g; 20/40MHz for 802.11n
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM	QPSK, 8 PSK, 16 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiplexing	TDM	TDM/OFDMA	TDM/CDMA	TDM/CDMA	CSMA
Duplexing	TDD, FDD	TDD initially	FDD	FDD	TDD
Frequency	3.5GHz and 5.8GHz initially	2.3GHz, 2.5GHz, and 3.5GHz initially	800/900/1,800/1,900/2,100MHz	800/900/1,800/1,900MHz	2.4GHz, 5GHz
Coverage (typical)	3-5 miles	< 2 miles	1-3 miles	1-3 miles	< 100 ft indoors; < 1000 ft outdoors
Mobility	Not applicable	Mid	High	High	Low

Tabla 7: Tabla comparativa de tecnologías inalámbricas.

### **3.3 Aplicación de WiMAX sobre HAPs**

Como se ha expuesto en el apartado anterior, WiMAX representa una gran solución al reto de los servicios de banda ancha inalámbricos. Además, los sistemas WiMAX representan una alternativa muy económica y eficiente, lo que supone un impulso para su implantación en países en vías de desarrollo. En este sentido y teniendo en cuenta las características técnicas de un sistema HAP, resulta evidente la gran combinación que dichas tecnologías producen. En este caso se supone una conexión WiMAX fija aplicando las más novedosas técnicas de modulación y con visión directa. Dichas cualidades dan lugar a un potente medio de comunicación con tasas de transmisión binarias muy altas y con grandes áreas de cobertura. Debido a las características propias de los HAP los enlaces con las distintas redes para otorgar el servicio de Internet podrían ser vía estaciones base terrestres o satélites, tal y como se muestra en la siguiente imagen (Figura 11).



**Figura 11.- Arquitectura general y enlaces de un sistema HAP**

Estas propiedades hacen que el sistema sea de rápido despliegue y con costes relativamente bajos. Además se estaría proporcionando un servicio de alta calidad a un marco muy amplio y global de la población.

Además los elementos que forman parte de una red HAP son relativamente bajos, ya que la complejidad reside en el transmisor o estación base (HAP). Los receptores

constarían de una antena directiva fija en lo alto de un edificio a poder ser con total visión directa con el HAP. Además a través de un sencillo sistema de división de frecuencia se obtendría la señal de difusión de video y por otra parte la señal de datos WiMAX. Simplemente con un módem y un punto de acceso inalámbrico (WiFi) obtendríamos cobertura en una zona de unos 50 metros.

Sin embargo los sistemas WiMAX estaban inicialmente concebidos para un modelo de estaciones base terrestres con una potencia limitada para una cierta distancia de cobertura. En este sentido, cabe destacar la importancia de los factores que entrarán en juego en el estudio del sistema de telecomunicación WiMAX sobre HAPs. Con ello, se hace referencia a las limitaciones propias de un sistema de telecomunicación (pérdidas, factores de ruido, SNR, etc.) y a la viabilidad de otorgar físicamente dicho servicio por parte de plataformas aéreas. No debe ser olvidado que el objetivo del sistema es proporcionar WiMAX fijo ya que las potencias de transmisión requeridas son más elevadas debido a las pérdidas de propagación. Con ello y aprovechando la característica de la altura de los HAPs se procederá a la implantación de antenas directivas en los altos de los tejados con visión directa (LOS) para tener las menores pérdidas globales y por tanto las mejores calidades de señales. Dichas calidades proporcionarán al sistema usar las modulaciones más potentes con los menores tiempos de guarda lo que dará lugar a unas grandes tasas binarias, lo que conlleva a un servicio de gran calidad.

### Antenas

Las antenas utilizadas por el sistema son diferentes en la transmisión respecto a la recepción. Las primeras serán bocinas cuya ganancia vendrá dada en función del coseno del ángulo de incidencia elevado a un factor. Por tanto la ganancia en transmisión seguirá la siguiente expresión:

$$G(\alpha) = G_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\alpha)^n \quad \text{Ecuación 7.}$$

En recepción sin embargo se utilizarán antenas parabólicas orientadas al HAP lo que proporcionará altas ganancias que no varían en función del ángulo de recepción. Ambas antenas serán estudiadas en el capítulo siguiente sobre aspectos de ingeniería con casos prácticos.

A continuación, el objetivo a estudiar será las nuevas condiciones de propagación que implica la implantación de WiMAX sobre HAPs. Posteriormente, al igual que en el bloque de difusión de video, se realizará una serie de simulaciones que tengan en cuenta los distintos factores de un sistema de telecomunicación y en especial los introducidos por nuestro sistema.

### **3.4 Parámetros de teoría de la señal y propagación**

Una vez expuestas las características principales de un sistema WiMAX se va a proceder a realizar un estudio sobre la propagación de la señal. Cómo se realizó anteriormente en la difusión de video, primeramente se analizará el sistema considerando una visión directa absoluta y posteriormente, dada la dependencia existente, se procederá a estudiar el escenario NLOS.

#### **1<sup>er</sup> Escenario de visión directa (LOS)**

Inicialmente y dado que el sistema está formado por una antena transmisora en el HAP a 22 kilómetros de altura y una antena receptora WiMAX orientada hacia el mismo se considerará un escenario de visión directa entre ambos terminales. En este caso y al igual que anteriormente se descompondrá el análisis de la señal en el sistema en diferentes etapas. Por último se realizara un balance global de todos los factores que intervienen en la comunicación.

#### **Pérdidas externas**

Al ser el medio de propagación básico del sistema el aire, es imprescindible tener en consideración los diferentes atenuaciones que afectan a la señal. Dichas atenuaciones están directamente relacionadas con la frecuencia de trabajo y se estudian mediante expresiones semi empíricas.

Pérdidas por espacio libre.

Al igual que se expuso en el bloque de difusión de señales de video, el medio de propagación del sistema es el aire. En este sentido las pérdidas de propagación globales vendrán dadas por la expresión básica pérdidas por espacio libre:

$$L_{fs} (dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad \text{Ecuación 1.}$$

En esta fórmula  $d$  es la distancia mientras que  $\lambda$  es la longitud de onda y ambas son utilizadas en unidades del sistema internacional (metros).

En esta ocasión y dado que WiMAX consta con un amplio espectro de funcionamiento en sus diversos estándares es necesario explicar sus efectos según esta expresión. Para las frecuencias de transmisión más bajas (estándares 802.16a y 802.16e) el efecto de las pérdidas de propagación por espacio libre esta cercano a las calculadas para la difusión de televisión digital. Sin embargo, al aumentar la frecuencia hasta llegar a las bandas no estandarizadas las pérdidas por propagación aumentan considerablemente. Así por ejemplo tenemos unas pérdidas por espacio libre de 133 dB para una frecuencia de 5 GHz mientras que para otra de 30 GHz obtenemos unas pérdidas de 149 dB (16 dB de diferencia de pérdidas). Resulta evidente pues, analizar y tener en consideración el estudio de una óptima elección de la frecuencia de las portadoras del sistema.

Por otra parte, dado que el sistema se basa en la transmisión por la troposfera (parte más baja de la atmósfera) es necesario considerar dentro de las pérdidas externas los distintos fenómenos meteorológicos que pueden interferir en el sistema. Dichos fenómenos son principalmente precipitaciones y situaciones de niebla o masas nubosas en general. En relación con estas pérdidas, la sufrida por la señal viene dada en función de la frecuencia de funcionamiento. A partir de esto los sistemas con frecuencias de trabajo inferiores a los pocos Giga Hertzios no tienen en consideración los efectos de la lluvia (prácticamente nulos) mientras que aquellos que superan los 3 Giga Hertzios si. A continuación se estudiarán las dos pérdidas más importantes: lluvia y niebla.

Pérdidas por lluvias

La atenuación por la lluvia se produce cuando una señal atraviesa la zona donde se está produciendo el fenómeno meteorológico. Dicho efecto se produce al atravesar el haz de información de frecuencia elevada las gotas de agua. A la salida el haz se desvía microscópicamente lo cual produce una atenuación de la señal.

Para calcular la atenuación producida por dicho fenómeno nos basaremos en la recomendación UIT-838. Con ella se calcula la atenuación específica del medio la cual viene dada en dB/kilómetro. Dicha atenuación vendrá definida por la intensidad de lluvia  $R$ (mm/h) y por dos constantes que dependen de la frecuencia  $\alpha$  y  $k$ . Dicha expresión y valores de la constante son:

$$\gamma = k \cdot R^\alpha \text{ (dB / km)} \quad \text{Ecuación 8.}$$

$$k = \frac{k_h + k_v + (k_h - k_v) \cdot \cos^2(\Theta) \cdot \cos(2 \cdot \tau)}{2}$$

$$\alpha = \frac{k_h \cdot \alpha_h + k_v \cdot \alpha_v + (k_h \cdot \alpha_h - k_v \cdot \alpha_v) \cdot \cos^2(\Theta) \cdot \cos(2 \cdot \tau)}{2 \cdot k}$$

A continuación se muestran algunos valores para las polarizaciones horizontal y vertical:

Frecuencia	$k_h$	$\alpha_h$	$k_v$	$\alpha_v$
6	0.00175	1.308	0.00155	1.265
8	0.00454	1.327	0.00395	1.31
10	0.0101	1.276	0.00887	1.264
20	0.0751	1.099	0.0691	1.065
30	0.187	1.021	0.167	1.0
40	0.350	0.939	0.310	0.929

**Tabla 8: Valores de  $k$  y  $\alpha$  en función de la frecuencia y la polarización.**

Sin embargo, la intensidad de lluvia caída es dependiente de la situación del HAP por lo que debe especificarse el lugar de implantación del sistema. En la siguiente imagen (Figura 25) podemos observar un mapa europeo delimitado por las distintas zonas de índice de precipitación:

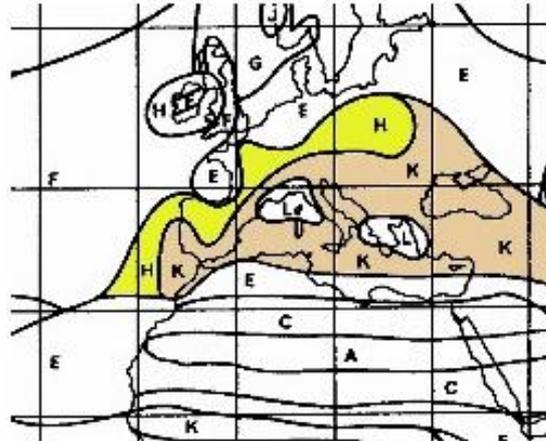


Figura 25.- Mapa de las zonas hidrometeorológicas.

Una vez sabida el lugar de implantación del HAP se aplicarán las correspondientes tasas de intensidad de lluvia. A continuación se muestran los valores de intensidad para las zonas K y H que engloban a toda España y gran parte del sur de Europa:

Porcentaje de tiempo (%)	R <sub>zonaH</sub> (mm/h)	R <sub>zonaK</sub> (mm/h)
99.7	4	4.2
99.9	10	12
99.97	18	23
99.99	32	42
99.997	55	70
99.999	83	100

Tabla 9: Tasas de intensidad de lluvia para las zonas K y H.

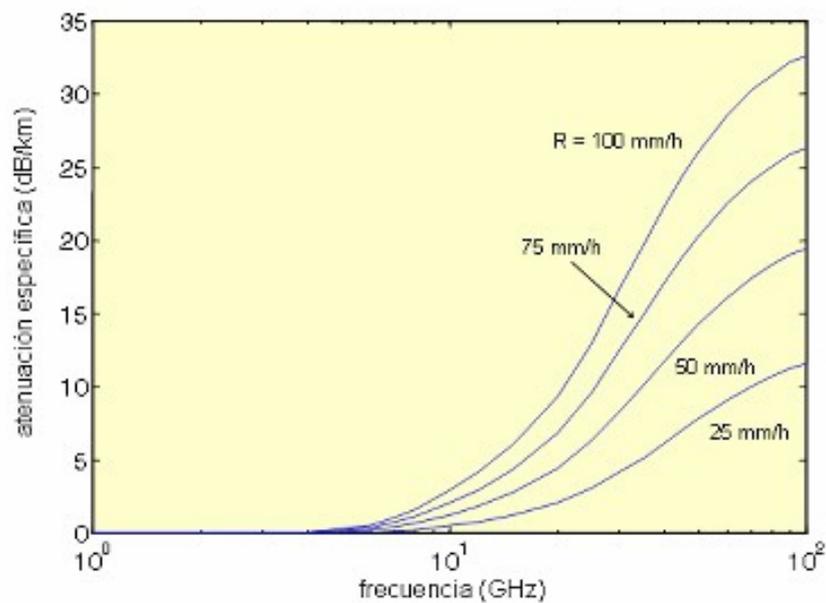
Por último para obtener las pérdidas totales por lluvia, deberemos utilizar la intensidad de lluvia calculada, ponderándola por la distancia efectiva:

$$A(R, p) = \gamma(R, p) L_{ef} \quad \text{Con} \quad L_{ef} = \frac{d}{1 + d/d_o} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Dónde  $d$  es la distancia que recorre la señal con lluvia y  $d_0$  es un factor de ponderación para calcular las pérdidas efectivas.

$$d_o = 35 e^{(-0,015 R_{0,01\%})} \quad \text{con} \quad R_{0,01\%} = \min (R_{0,01\%}, 100 \text{ mm/h})$$

Con las expresiones y datos facilitados se puede obtener una función representativa de las pérdidas de atenuación por lluvia en función de la frecuencia y la tasa de precipitación tal y como muestra la Figura 26:



**Figura 26: Atenuación específica en función de frecuencia y tasa de precipitación.**

Las pérdidas producidas por dichos fenómenos físicos son menores que las de propagación por espacio libre pero se deberá mantener unos ciertos márgenes para que la calidad del sistema no se vea empeorada en situaciones de condiciones meteorológicas adversas.

Pérdidas por niebla

Una vez analizado el fenómeno de la lluvia, se procederá a estudiar el segundo factor meteorológico más importante: la niebla. Para crear un modelo de la misma se considerará su composición como pequeñas partículas de agua de grosores inferiores a 1 milímetro.

Para caracterizar la niebla se suele usar la aproximación de Rayleigh, la cual define la atenuación específica de la niebla en función de la densidad de la misma y un coeficiente de atenuación de la misma. A continuación se muestra dicha expresión y sus unidades:

$$\gamma_{niebla} = k \cdot M \text{ (dB / km)} \quad \text{Ecuación 10.}$$

$\gamma_{niebla}$  : Atenuación específica de la niebla (dB/km)

K: Coeficiente de la atenuación específica (dB/Km)/(g/m<sup>3</sup>)

M: Densidad de niebla (g/m<sup>3</sup>)

El coeficiente de la atenuación específica viene dado por la frecuencia a la que se trabaja y a la constante dieléctrica compleja del medio (agua). Según esto, se tiene la siguiente expresión:

$$K_i = \frac{0.819 \cdot f}{\epsilon'' \cdot (1 + \eta^2)} \text{ (dB / km)(g / m}^3\text{)}$$

En esta ocasión la frecuencia viene dada en Giga Hertzios debido a que es en ese rango donde se producen dichas pérdidas por propagación. En lo referente a  $\epsilon$  y  $\eta$ , las expresiones son:

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad \text{dónde}$$

$$\epsilon' = \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2} + \epsilon_2$$

$$\varepsilon'' = \frac{f \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \left( 1 + \left( \frac{f}{f_p} \right)^2 \right)} + \frac{f \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left( 1 + \left( \frac{f}{f_s} \right)^2 \right)}$$

$$\varepsilon_0 = 77,6 + 103,3 \cdot (\theta - 1)$$

$$\varepsilon_1 = 5,48$$

$$\varepsilon_2 = 3,51$$

$$\theta = \frac{300}{T}$$

$$f_p = 20,09 - 142 \cdot (\theta - 1) + 294 \cdot (\theta - 1)^2 \text{ (GHz)} \quad \text{Frecuencia de relajación primaria}$$

$$f_s = 590 - 1500 \cdot (\theta - 1) \text{ (GHz)} \quad \text{Frecuencia de relajación secundaria}$$

En donde T es la temperatura en grados Kelvin.

Por otra parte la densidad de niebla que viene  $\text{g/m}^3$  tiene un valor aproximada de que normalmente oscila alrededor de  $0.1 \text{ g/m}^3$ . En algunas ocasiones con niebla extremadamente densa se alcanzan valores de hasta  $0.7 \text{ g/m}^3$ .

A continuación se muestra una gráfica para los valores más característicos de la constante de atenuación K (Figura 27).

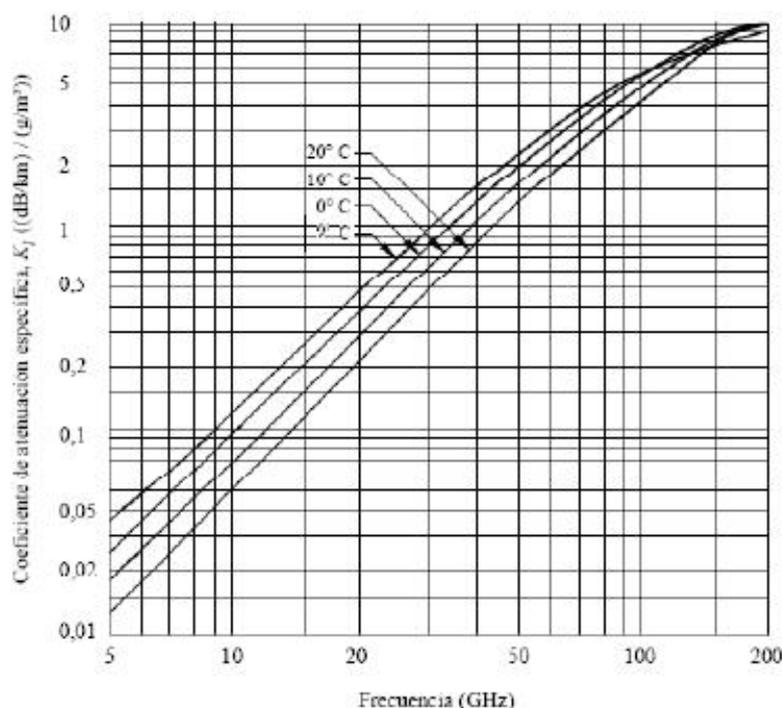


Figura 27: Atenuación específica de la niebla en función de la temperatura y la frecuencia.

### Pérdidas internas

#### Potencia mínima en recepción

Dentro de los dispositivos que forman el sistema WiMAX es indispensable comprobar la importancia del enlace de frecuencia en todos ellos. Esto se debe a que todos los dispositivos de la cadena: filtros, osciladores, amplificadores... (de transmisión o recepción) deben de adaptarse a la misma. Por ejemplo en la cadena de transmisión, la ganancia y factor de ruido de un amplificador de radio frecuencia antes de la antena dependerá de la frecuencia a la que debe de operar.

Sin embargo, una vez adquiridos los datos técnicos de los dispositivos operando a una frecuencia dada el cálculo de los diferentes factores limitantes se realiza de la misma manera que en la difusión de los servicios digitales. Dicho esto, la potencia de ruido vendrá dada por:

$$N(\text{dBm}) = -114 + NF + 10 \log_{10}(B)_{\text{MHz}} \quad \text{Ecuación 3.}$$

En esta expresión NF es el factor de ruido del receptor (en decibelios) y B es el ancho de banda del canal WiMAX utilizado (en Mega Hertzios). En este sentido se ha considerado un filtrado adaptado al ancho de banda de cada canal para cada una de las posibles configuraciones de WiMAX.

Tras haber calculado la potencia de ruido en recepción la señal mínima detectable o sensibilidad (S) se obtiene directamente con la señal a ruido necesaria en recepción. Teniendo esto en consideración lo anteriormente comentado la sensibilidad se obtendrá por la siguiente expresión:

$$S(\text{dBm}) = N + \text{SNR}_{\text{mín}} \quad \text{Ecuación 4.}$$

En esta expresión  $\text{SNR}_{\text{mín}}$  corresponde a la cantidad de señal a ruido necesaria para cumplir una tasa de error dada. En este sentido, dicha relación vendrá dado por las distintas modulaciones y probabilidades de error admisible, las cuales serán estudiadas a continuación.

En el estudio de los sistemas HAPs y en general en todos los sistemas que requieren un medio de comunicación compartido como es el aire, se requiere una adaptación rigurosa a las normas y disponibilidades del mismo. En este sentido y como más adelante se analizará en el estudio del espectro radioeléctrico disponible, se han considerado tres regiones de funcionamiento. Por una parte la banda estandarizada (FWA) de 3.5 Giga Hertzios y por otra las expensas de estandarización en 5 y 30 Giga Hertzios. Por otra parte se ha considerado diferentes anchos de banda para cada una de dichas frecuencias disponibles. Considerando una modulación 64-QAM sobre una portadora multiplexación OFDM con 2048 portadoras, se seleccionará una ancho de banda de canal variable entre 1.25 y 20 MHz en función del espacio disponible de las 3 bandas de frecuencia. En este caso se ha considerado un ancho de banda por canal de 20 MHz (el máximo).

A continuación se expone una tabla con las distintas relaciones señal a ruido mínimas, necesarias para una tasa de error determinada. En esta ocasión y debido a que son datos extrapolados de casos prácticos los datos se encuentran referidos a una tasa de error de bloque (BER) de  $2 \times 10^{-6}$ . Por último y como un dato más práctico, se definen las

diferentes SNR mínimas con su correspondiente modulación y tasa de codificación (Tabla 10).

Modulación	Tasa de codificación	SNR <sub>mín</sub> en recepción
BPSK	1/2	6.4
QPSK	1/2	9.4
QPSK	3/4	11.2
16-QAM	1/2	16.4
16-QAM	3/4	18.2
64-QAM	2/3	22.7
64-QAM	3/4	24.4

**Tabla 10: SNR mínimas necesarias para las distintas modulaciones y tasas de codificación.**

### **Balance general**

Por último y para cerrar el bloque del análisis de la señal del sistema se procede a realizar un análisis global del enlace aplicando la ecuación de balance. En este caso y teniendo en consideración que se da un sistema LOS donde el HAP se encuentra por encima de los distintos edificios, consideramos un desvanecimiento por sombras despreciable. La potencia recibida en relación con lo anteriormente comentado vendrá dada por la siguiente expresión:

$$P_r = P_t + G_{tx}(\phi) + G_{rx}(\Theta) - L_{fs} - L_f - L_{otras} - M \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde:

- $P_t$  es la potencia transmitida en dBm,
- $P_r$  es la potencia recibida en dBm,
- $G_{tx}$  es la ganancia de la antena HAP en la dirección de la antena receptora,
- $L_f$  son las pérdidas secundarias totales del transmisor y receptor,
- $L_{fs}$  son las pérdidas de propagación por el espacio libre,
- $L_{otras}$  otras pérdidas como por difracción, vapor, lluvia... y

- M es el margen del enlace de bajada. Debe de otorgársele un valor de compensación para los cambios de ganancia de las antenas y los posibles cambios en las pérdidas de propagación.

En otra posible aplicación de la ecuación se asignará la potencia de recepción como fija dada por la sensibilidad mínima del sistema y se despejará las pérdidas por espacio libre. Aplicando la ecuación de dichas pérdidas se obtendrá la máxima distancia de cobertura del sistema. Esta distancia limita la altura del HAP y por otra parte el radio máximo de cobertura del sistema.

## **2º Escenario de visión no directa (NLOS)**

Al igual que se realizó en el bloque de televisión digital, los datos que se han mostrado anteriormente están ligados a una comunicación 100% de visión directa (LOS). Sin embargo, los distintos objetos que se sitúan en la superficie terrestre hacen que dicha comunicación sea muy difícil de obtener. Dichos impedimentos físicos para la señal consisten en edificios, árboles y demás elementos situados a una altura similar a la de los lugares de implantación de las antenas receptoras. Dado que dichas pérdidas dependerán de numerosos factores inabarcables por nuestro estudio (orografía muy detallada), se propondrán unas pérdidas en función del ángulo de incidencia de la señal, más una atenuación constante que representa unas pérdidas mínimas. Por lo tanto y según lo mencionado anteriormente asociado a una comunicación de visión no directa se asumirán las siguientes pérdidas:

$$L_p (dB) = 10 \cdot \left( \frac{\alpha}{90} \right) + 1 \quad \text{Ecuación 6.}$$

Cómo se introdujo anteriormente  $\alpha$  es el ángulo de penetración medido desde la vertical y las pérdidas vienen dadas en decibelios. Las pérdidas por sombra oscilarán entre un margen de 1 y 6 dB, ya que para el caso de querer obtener las pérdidas de interiores deberá de utilizarse modelos más detallados.

### **3.5 Enclave frecuencial**

A lo largo de lo analizado en el sistema WiMAX desde HAP una de los principales factores observados ha sido la frecuencia. Esta contribuye tanto en las pérdidas originadas en el sistema (espacio libre, lluvia, niebla...) como en la potencia de ruido del sistema y los costes de los componentes que forman el mismo. En relación con todo esto, cabe destacar la importancia de la elección de la misma en función de la disponibilidad y coste de usar el espectro del medio aéreo. En este sentido, se requiere el estudio de la frecuencia utilizada en función del país en el que se desea implantar el sistema y su organización espectral a modo de no interferir con otros sistemas. Sin embargo debido a la globalización y al esfuerzo realizado por los organismos de estandarización, dichas organizaciones son cada vez más independientes de los países. Este aspecto es clave para el desarrollo de la tecnología debido a que otorga mayores opciones de desarrollo, flexibilidad y producción en serie a los fabricantes.

A continuación se procede a mostrar una tabla con las posibles bandas de frecuencia disponible para la señal de WiMAX sobre HAPs. Además se añaden una serie de notas con algunas peculiaridades sobre la implantación del sistema en diferentes países desarrollados como Estados Unidos y Corea dónde el desarrollo de la tecnología se ha orientado a bandas específicas:

Designation	Frequency Allocation	Amount of Spectrum	Notes
Fixed wireless access (FWA): 3.5GHz	3.4GHz – 3.6GHz mostly; 3.3GHz – 3.4GHz and 3.6GHz – 3.8GHz also available in some countries	Total 200MHz mostly; varies from $2 \times 5\text{MHz}$ to $2 \times 56\text{MHz}$ paired across nations	Not generally available in the United States. A 50MHz chunk from 3.65GHz – 3.70GHz being allocated for unlicensed operation in United States.
Broadband radio services (BRS): 2.5GHz	2.495GHz – 2.690GHz	194MHz total; 22.5MHz licenses, where a 16.5MHz is paired with 6MHz	Allocation shown is for United States after the recent change in band plan. Available in a few other countries as well.
Wireless Communications Services (WCS) 2.3GHz	2.305GHz–2.320GHz; 2.345GHz – 2.360GHz	Two $2 \times 5\text{MHz}$ paired; two unpaired 5MHz	Allocation shown for United States. Also available in Korea, Australia, New Zealand.
License exempt: 2.4GHz	2.405GHz – 2.4835GHz	One 80MHz block	Allocation shown for United States but available worldwide. Heavily crowded band; used by Wi-Fi.
License exempt: 5GHz	5.250GHz–5.350GHz; 5.725GHz – 5.825GHz	200MHz available in United States; additional 255MHz to be allocated	Called U-NII in United States. Generally available worldwide; lower bands have severe power restrictions.
UHF band: 700MHz	698MHz – 746MHz (lower); 747MHz – 792MHz (upper)	30MHz upper band; 48MHz lower band	Allocations shown for United States, only 18MHz of lower band auctioned so far. Other nations may follow.
Advanced wireless services (AWS)	1.710GHz–1.755GHz 2.110GHz – 2.155GHz	$2 \times 45\text{MHz}$ paired	Auctioned in the United States. In other parts of the world, this is used for 3G.

**Tabla 11: Bandas de frecuencia disponibles inferiores a 10 GHz.**

El uso de las distintas bandas de frecuencias vendrá dado por la situación en concreto. Por ejemplo más adelante, en el caso práctico se analizarán 3 modelos diferentes: urbano, suburbano y rural. En el caso de los dos primeros se requerirá de unas frecuencias estandarizadas que aseguren una mínima interferencia. Esto se debe a que al encontrarse en medio urbano habrá más competencia y mayor número de servicios de radio frecuencia que puedan interferir en nuestra señal. Por otra parte en un medio rural donde existe poca competencia y servicios radioeléctricos se podrán usar bandas de frecuencias no estandarizadas con una baja interferencia.

### **3.6 Simulaciones**

En el siguiente bloque se va proceder a mostrar tal y como se hizo en el bloque de televisión digital un gran número de simulaciones en función de diferentes parámetros. Debido a la cuantía de las mismas se dividirá el contenido en simulaciones independientes, que una tras otra tratará de englobar todos los factores de la comunicación. En los sistemas WiMAX existen dos grandes bloques de estudio en adicción con el sistema de difusión de vídeo.

Por una parte un factor determinante, será la banda de frecuencias en la que se esté trabajando ya que, tal y como se ha visto, existe un gran número de factores dependientes del mismo. Por ello, las simulaciones estarán divididas en tres bloques principales más un bloque extra. El primero analizará las distintas simulaciones para una frecuencia alrededor de los 3.5 GHz de la banda estandarizada. En segundo lugar, se realizarán las mismas simulaciones para una frecuencia de funcionamiento de 5 GHz correspondiente a la banda exenta de licencia. En tercer lugar, las simulaciones estarán regidas por una banda de frecuencia de 28 GHz, la cual es la banda destinada originalmente para las comunicaciones HAP. Por último se añadirá una sección extra para frecuencias de funcionamiento mayores a 30 GHz.

En segundo lugar las diferentes configuraciones de las antenas generarán distintas áreas de cobertura en función del número de haces y coronas. Dichas configuraciones serán añadidas dentro de cada uno de los bloques con el objetivo de observar su influencia para cada estudio.

Por último y como metodología a proceder, se realizarán una serie de conclusiones al final de cada uno de los bloques de la frecuencia correspondiente tras realizar la simulación.

### **3.6.1 Análisis WiMAX a 3.5 GHz**

Tal y como se ha mencionado anteriormente, nuestra primera banda de simulación se situará en los 3.5 GHz. El objetivo de esta simulación es mostrar los resultados que producen las diferentes constelaciones para una banda de frecuencias relativamente bajas. Debido a que estamos en una zona de frecuencias no muy elevadas podremos construir filtros más precisos, por lo que el ancho de banda de los canales será considerado de 10 MHz. Además en estas frecuencias no se consideraran pérdidas por lluvias y niebla.

Por otra parte debido a que las frecuencias de funcionamiento del sistema no sobrepasan los 5 GHz la potencia de transmisión puede ser relativamente elevada (máxima de 20 Vatios). Esto se debe a que los amplificadores de potencia trabajan eficientemente a dichas frecuencias tal y como se verá más adelante. Por ello se ha elegido evaluar el sistema en las tres potencias de transmisión más elevadas, dejando las de menor potencia para las altas frecuencia.

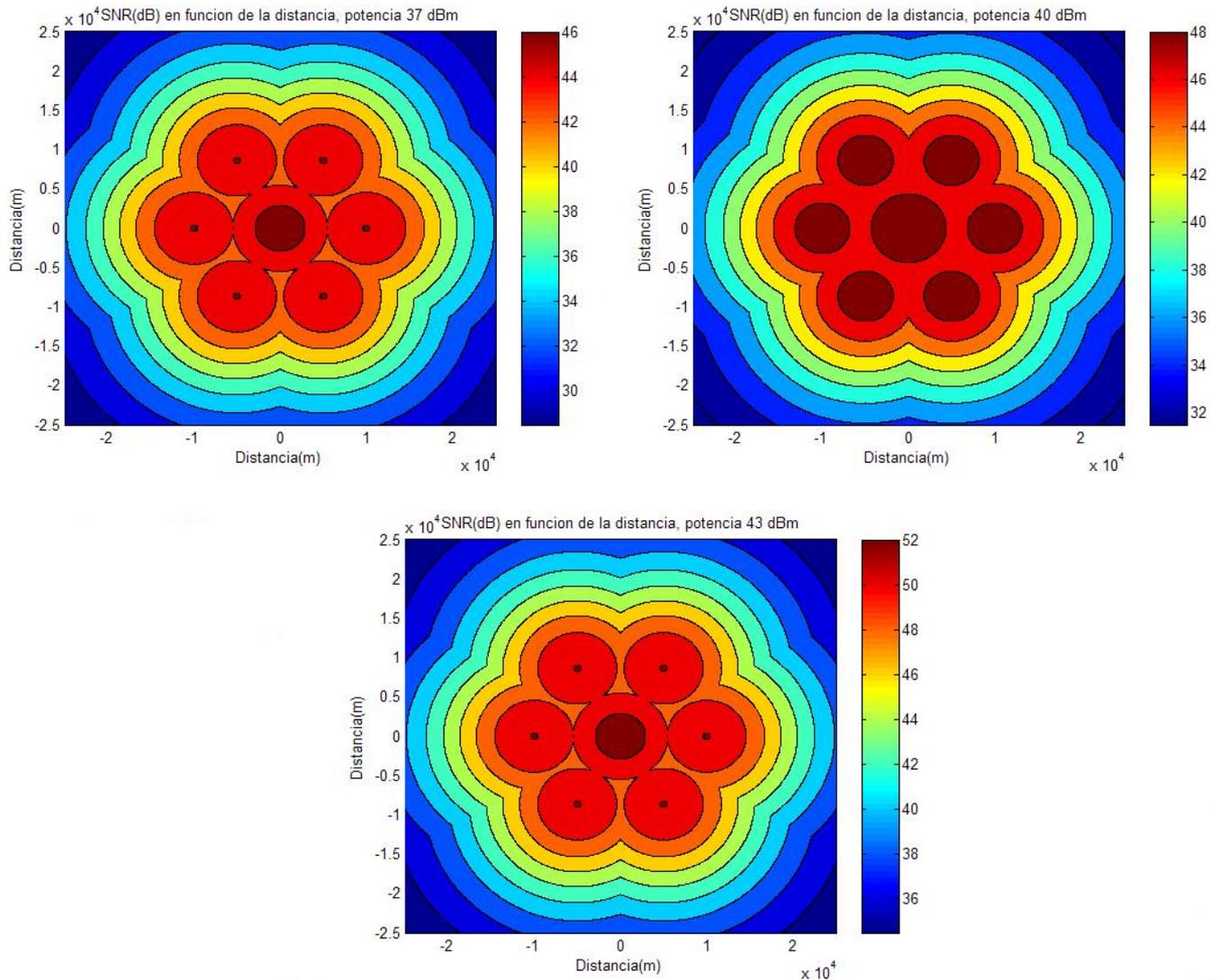
#### **1ª Simulación: SNR vs POTENCIA DE TRANSMISIÓN**

En esta primera simulación, dado que la potencia de transmisión puede ser alta (de 5 a 20 Vatios). Se han elegido dos de las configuraciones de coronas más sencillas posibles:

##### *1ª configuración (haz principal + 6 haces en la primera corona)*

En la primera parte se observarán los resultados para una distribución de un núcleo y seis haces en la primera corona. Debido a la simetría del sistema, cada haz se situará a 60° respecto a su anterior y sucesivo. Dado que el área geográfica que se desea cubrir es de alrededor de 20 kilómetros y que a medida que nos alejamos del centro la señal recibida es menor la circunferencia de la primera corona se sitúa a 10 kilómetros del centro. Debido a las pérdidas de propagación por espacio libre, la SNR recibida en los distintos haces es menor que la cantidad de señal recibida en la zona central. Dicho fenómeno se caracteriza ya que los círculos centrales de los distintos haces son de un tamaño más reducido.

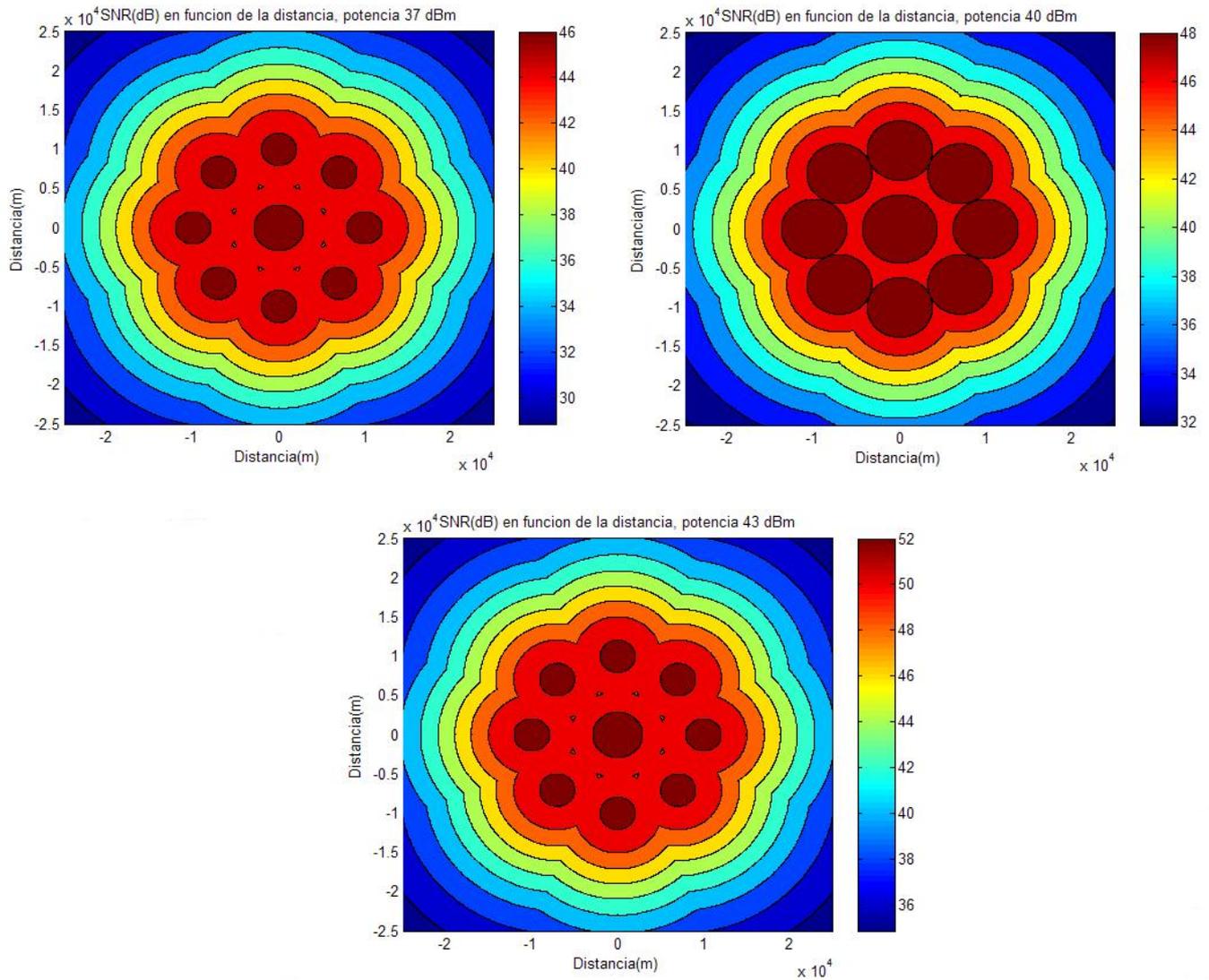
A continuación se muestran las relaciones señal a ruido recibidas para tres potencias de transmisión posibles a estas frecuencias (5 10 y 20 Vatios):



**Figura 28: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+6).**

2ª configuración (haz principal + 8 haces en la primera corona)

En esta ocasión y con el objetivo de mejorar las zonas de menor cobertura (huecos de la primera corona) se va a proponer una segunda configuración basada en un haz central y una corona circular de 8 haces. Esto supone un mayor coste en el número de antenas en el transmisor pero mejora la SNR recibida. Al igual que en la anterior configuración sólo se va a realizar la simulación para las potencias de transmisión más altas. Así pues, teniendo en cuenta todo lo anteriormente comentado se obtienen los siguientes resultados mostrados en la siguiente gráfica.



**Figura 29: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+8).**

Como se observa, las SNR recibidas aumentan cuantitativamente respecto en la anterior configuración, obteniendo de esta forma zonas más uniformes de mayor nivel de señal. Hay que destacar que el hecho de añadir dichos haces produce una separación entre los mismos de  $45^\circ$  lo que produce una mayor compactación de las zonas de cobertura.

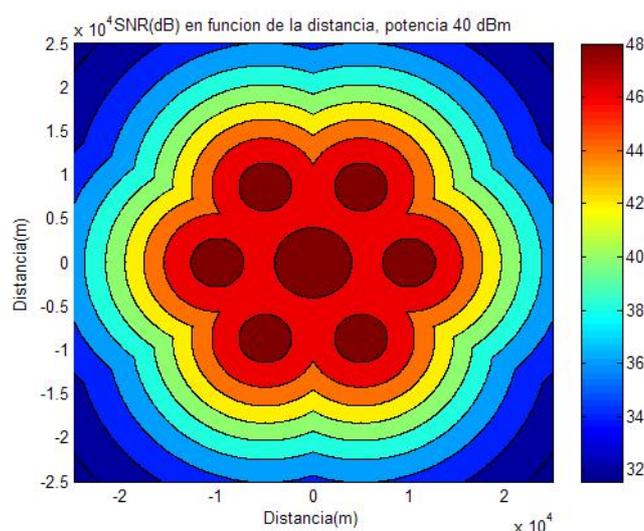
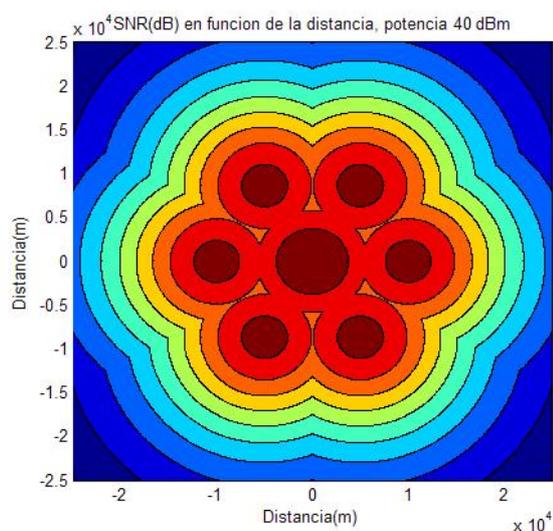
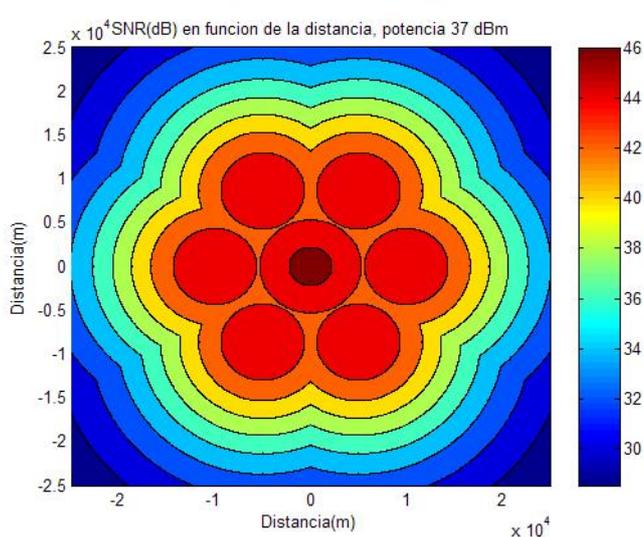
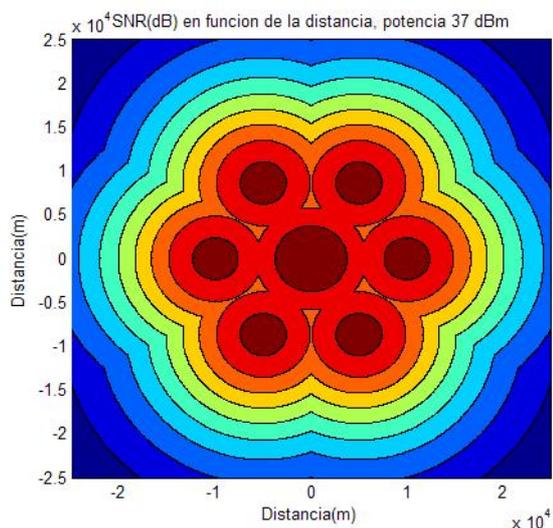
**2ª Simulación: SNR vs ESTABILIDAD DEL HAP**

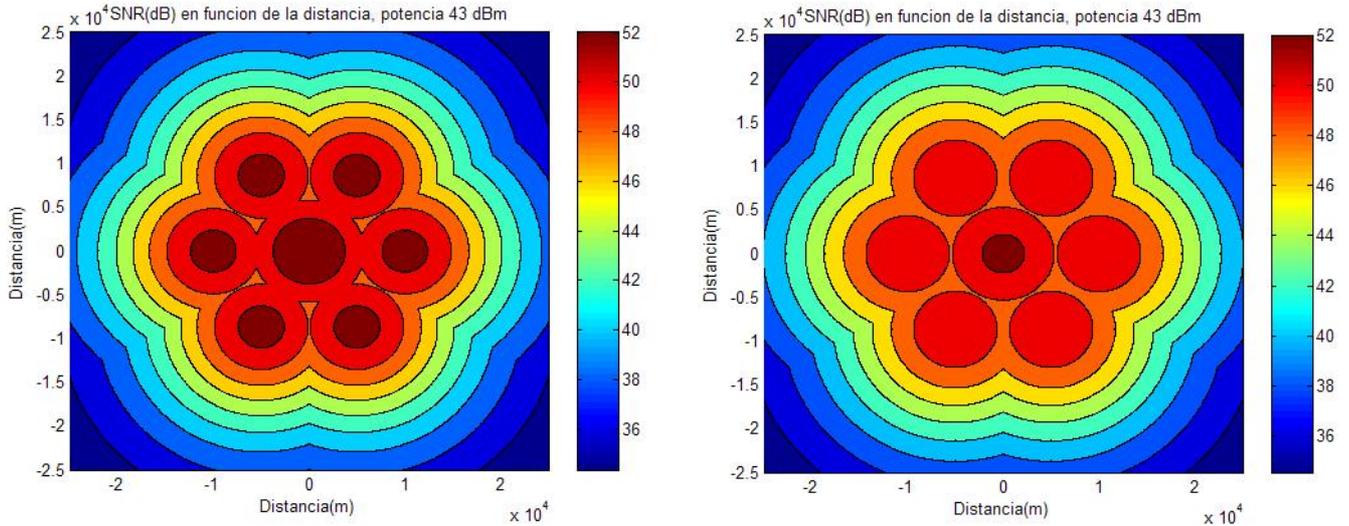
Al igual que se realizó en el bloque de difusión digital donde se comprobó los efectos y consecuencias del balance de la plataforma aérea, a continuación se propone el estudio del mismo proceso. En esta ocasión y debido a los resultados satisfactorios obtenidos en el apartado anterior, se van a mantener las simulaciones con las dos configuraciones anteriores.

*1ª configuración (haz principal + 6 haces en la primera corona)*

**ALTURA DEL HAP 20 Km**

**ALTURA DEL HAP 23 Km**



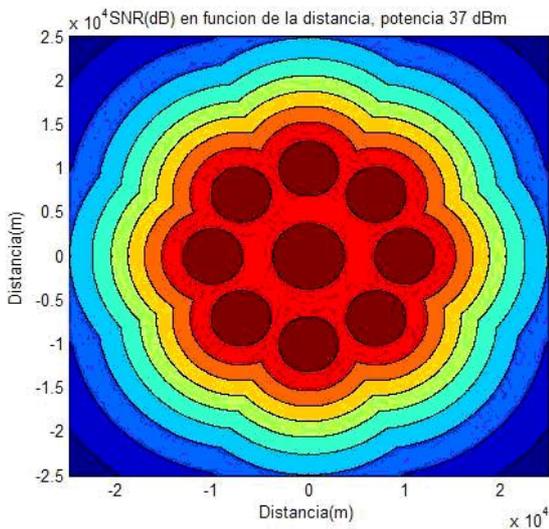


**Figura 30: SNR recibida en función de las potencias de transmisión y altura (conf 1+6).**

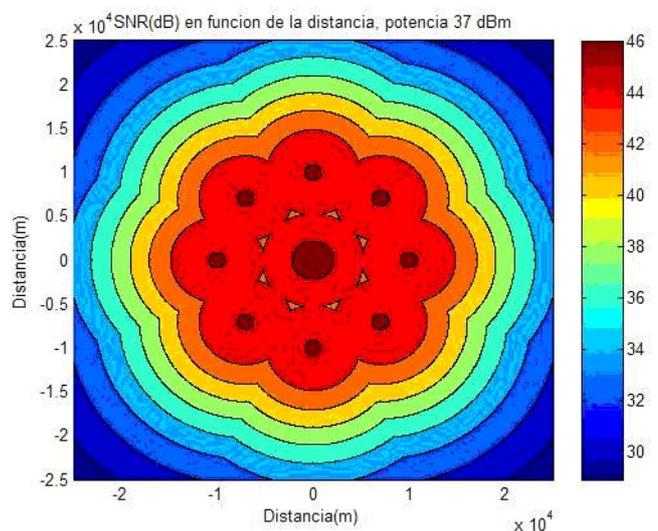
2ª configuración (haz principal + 8 haces en la primera corona)

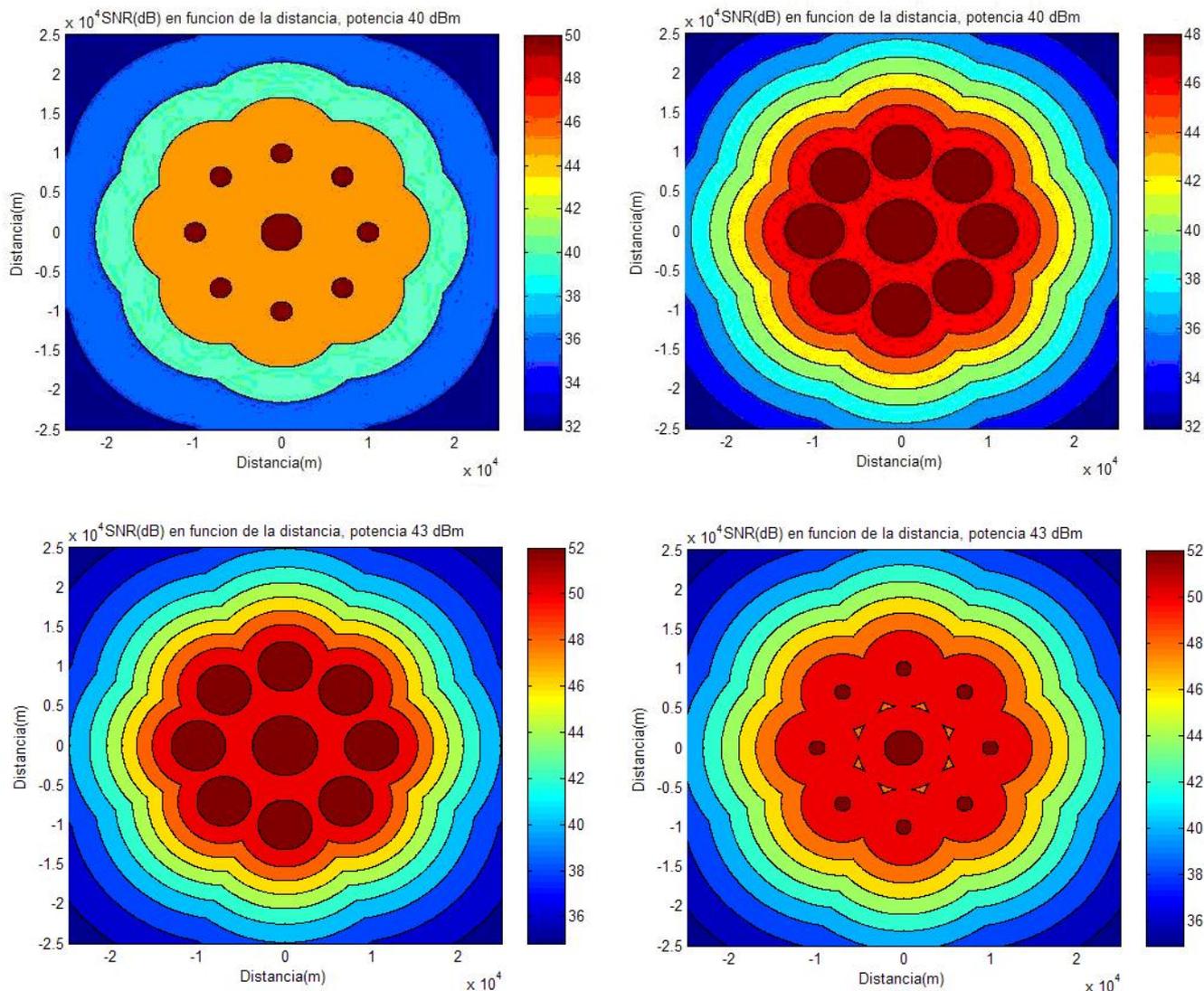
A continuación al igual que en anteriores simulaciones, se realizará el estudio de estabilidad del HAP para las distintas alturas, para la configuración de un haz principal y una corona primaria de ocho haces:

**ALTURA DEL HAP 20 Km**



**ALTURA DEL HAP 23 Km**





**Figura 31: SNR recibida en función de las potencias de transmisión y altura (conf 1+8).**

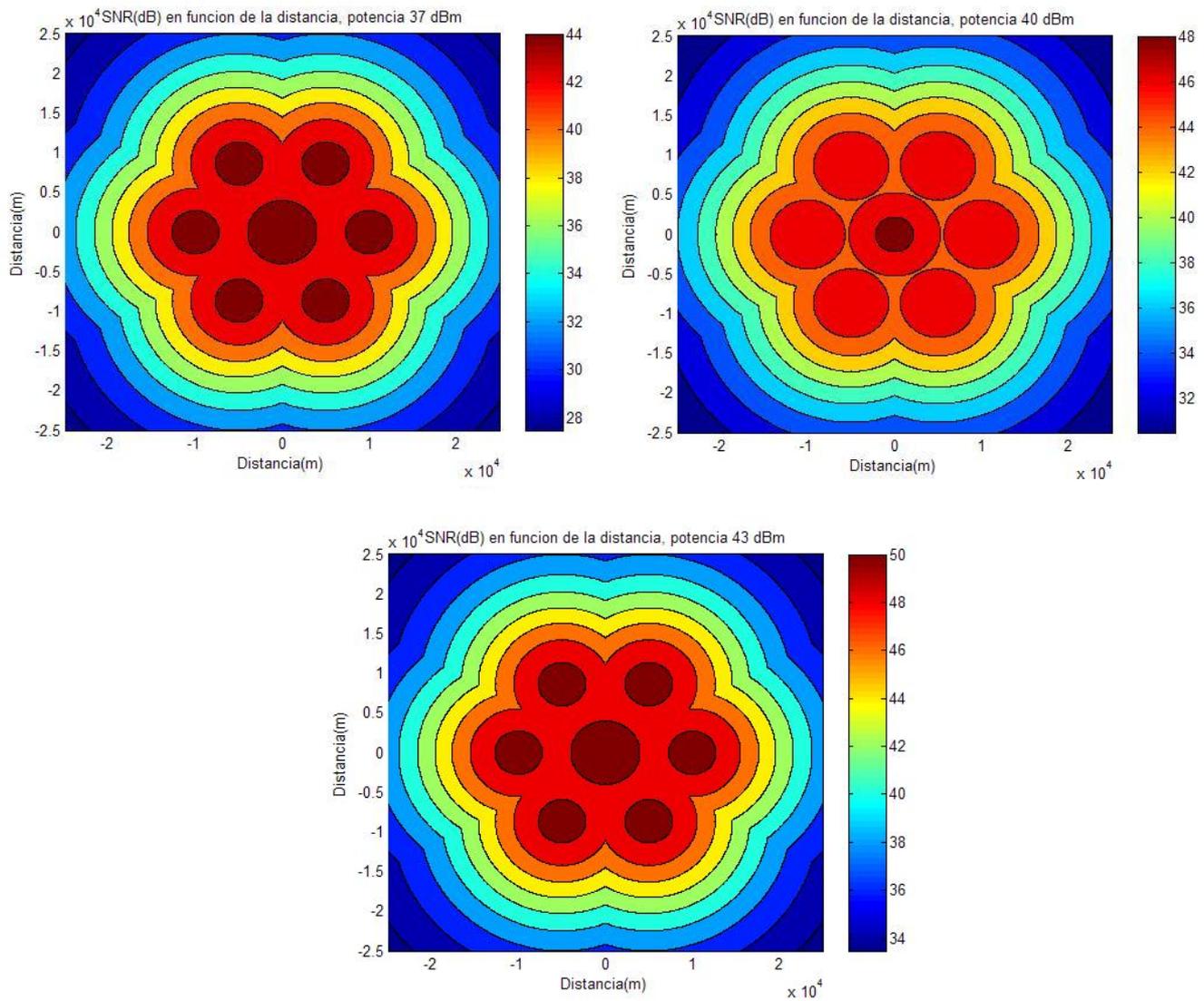
Como puede verse a lo largo de la simulación, la cobertura recibida en el caso de que la plataforma gane altura, conlleva una correspondiente pérdida de la señal debido a las pérdidas por espacio libre.

### **3ª Simulación: MÁRGENES POR SOMBRA**

Por último y de una forma más realista, se va a proceder a la imposición de unos márgenes por sombra. Como se ha recalado a lo largo de la práctica la propiedad LOS no podrá ser verificada en el cien por cien de los casos. En este sentido, a medida que nos alejemos del centro físico del sistema se producirá una mayor probabilidad de desvanecimiento por sombra proporcional al ángulo de incidencia de la señal. Según esto,

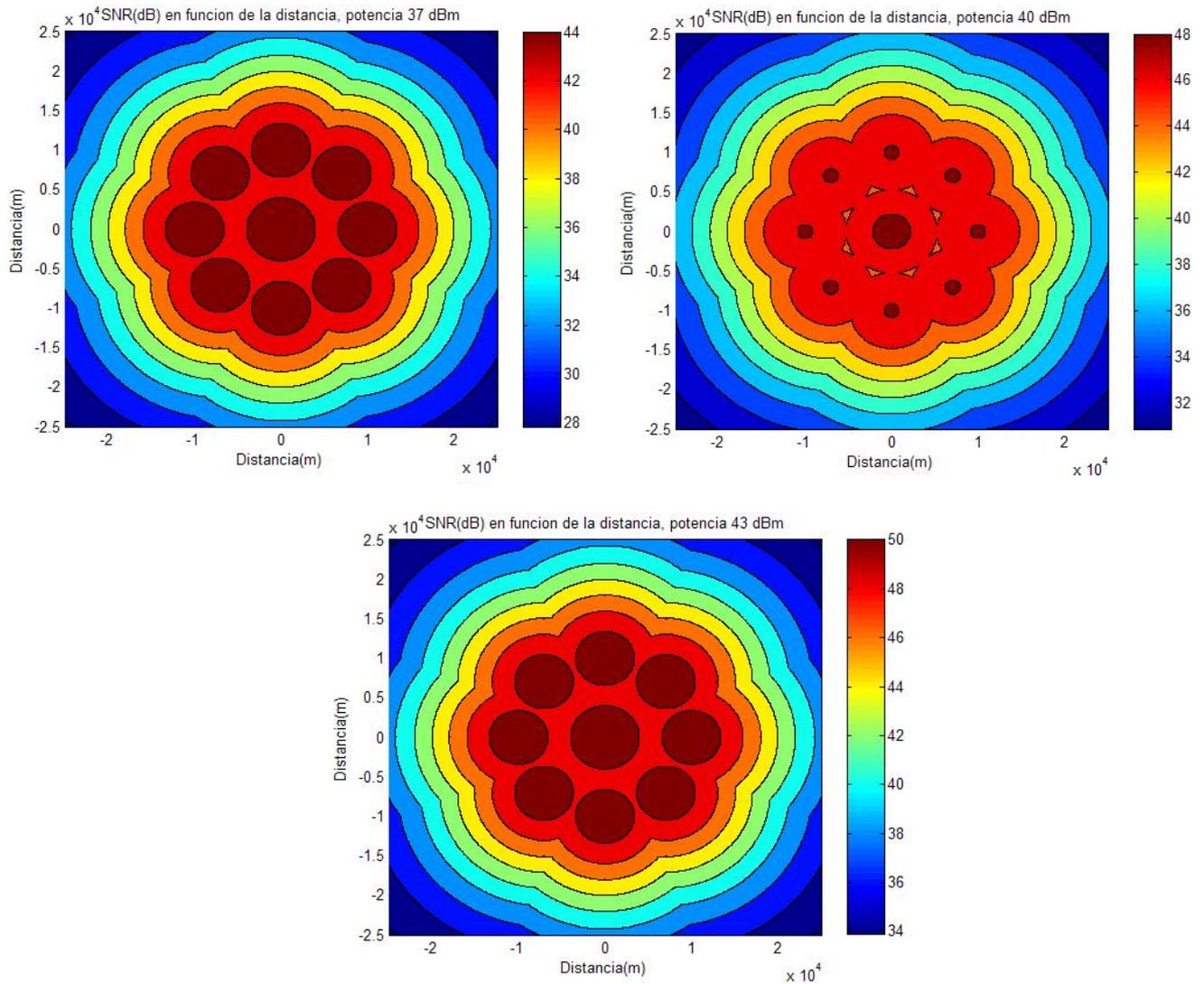
se dispone a mostrar los resultados obtenidos para dicha propiedad en función de la estabilidad del HAP (solamente se representará la de peor situación máxima altura). Aunque dichos fenómenos supongan unas mayores pérdidas (tanto en propagación como desvanecimientos) se van a continuar con las dos configuraciones marcadas al inicio debido al amplio margen que se ha obtenido anteriormente.

*1ª configuración (haz principal + 6 haces en la primera corona)*



**Figura 32: SNR con Msombra recibida en función de las potencias de transmisión (conf1+6).**

2ª configuración (haz principal + 8 haces en la primera corona)



**Figura 33: SNR con margen de sombra recibida en función de las potencias de transmisión (conf1+8).**

Como se puede apreciar en ambas distribuciones la caída ha sido aproximadamente cercana a los 3 decibelios y ha ido aumentando a medida que el punto se sitúa en las lejanías del centro. Aún así las relaciones señales a ruido obtenidas son muy satisfactorias.

### **CONCLUSIONES A 3.5 GHz**

Las simulaciones realizadas han verificado la viabilidad del sistema para la frecuencia de trabajo a 3.5 GHz. En dicho sentido, aun considerando las peores condiciones de pérdidas por falta de estabilidad de la plataforma y desvanecimientos por sombra, se posee amplios márgenes de relación señal a ruido. En este sentido y en concordancia con los enclaves frecuenciales debe de destacarse la posibilidad de introducción de las más potentes modulaciones para esta banda de baja frecuencia. Por tanto se recomienda potentes modulaciones como 128 o 256 QAM que permitan mayores tasas binarias. Esto requerirá una mayor SNR para mantener la tasa de error máxima que en esta simulación ha quedado probado que se posee.

A parte de esto la complejidad y coste de los dispositivos a dicha frecuencia es muy reducida (comparándola con otras frecuencias mayores) por lo que representa una opción viable y económica (en términos técnicos).

#### **3.6.2 Análisis WiMAX a 5 GHz**

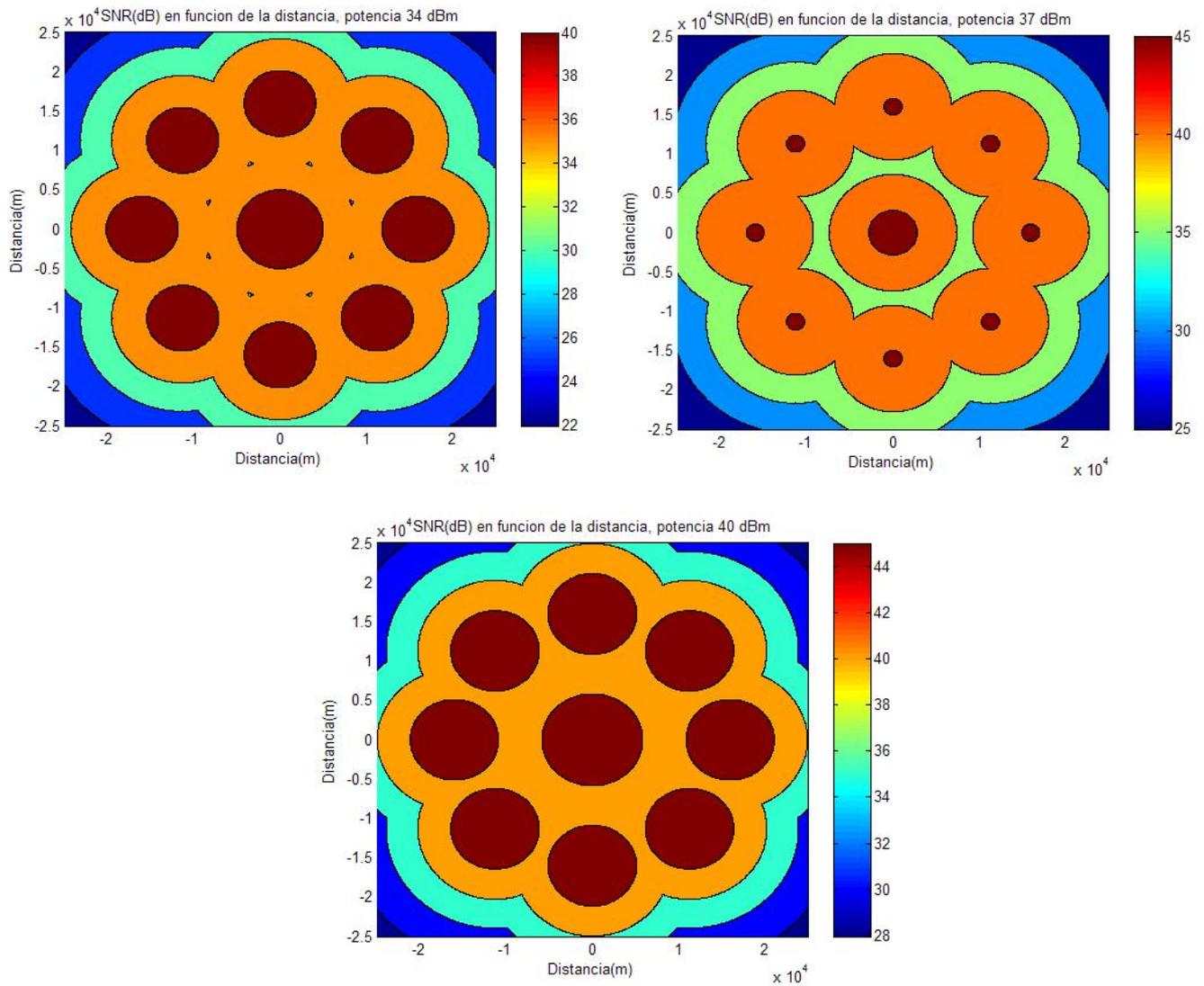
A continuación se va a realizar la simulación para la segunda banda de frecuencias con gran potencial para ser usada. El paso de aumento a esta frecuencia implica el cambio de varios factores a estudiar, algunos de los cuales son:

- La potencia de transmisión se encuentra más limitada (se tomará de 2.5 a 10 Vatios) por lo que no se utilizará la potencia de 20 Vatios. Esto es debido a dos factores: La frecuencia de trabajo es más elevada lo que implica una mayor dificultad para obtener altas potencias de transmisión; Como se explicará a continuación se van a utilizar mayor número de antenas para crear nuevos diagramas de radiación.
- A diferencia de la simulación en la banda de 3.5 GHz y debido a que se superan ampliamente los 4 GHz umbrales se va a tener en consideración las pérdidas por lluvia. Dichas pérdidas estarán en concordancia con lo estudiado anteriormente en

el plano teórico, con lugar de implantación Madrid y una probabilidad de correcto funcionamiento para un porcentaje de tiempo superior al 90% ( $k_h=0.00175$   $\alpha_h=1.308$ ).

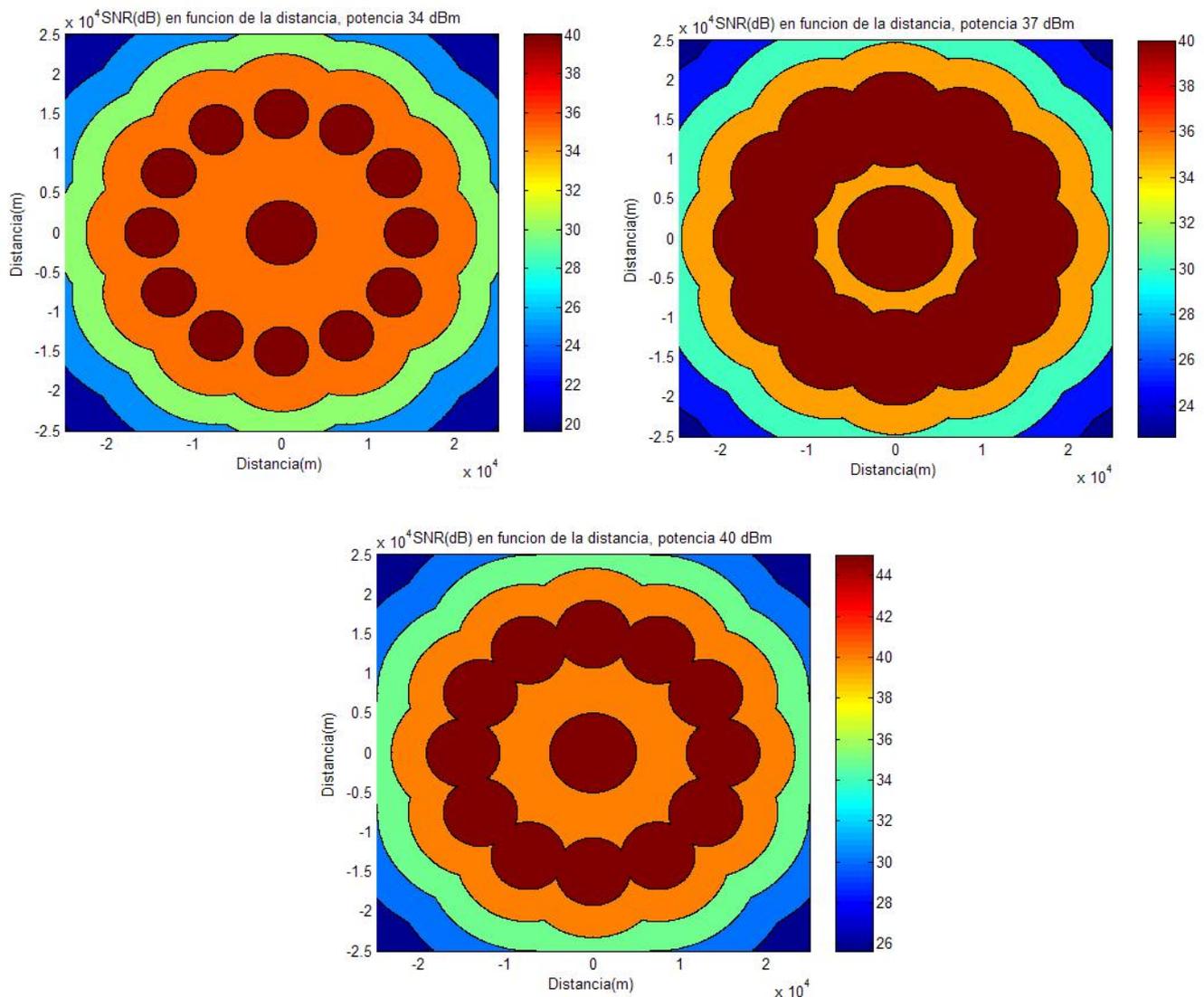
- Igualmente y debido a dicho aumento de frecuencia se introducirán en la simulación las pérdidas niebla o simplemente masas nubosas. En este sentido y según lo visto en el apartado teórico se van a fijar unas pérdidas fijas de 1 decibelio correspondiente a un caso perjudicial extremo.
- Con el objetivo de apaciguar las nuevas pérdidas se va a proceder a distintas configuraciones de antenas para lograr una mayor relación señal a ruido. En esta banda de frecuencia de 5 GHz se van a proponer dos configuraciones diferentes. La primera consiste en un núcleo central y 8 haces en la primera corona (1+8). La segunda configuración surge añadir cuatro antenas más para lograr un núcleo central y doce haces en la primera corona (1+12). Por tanto es evidente que se suprimirá la simulación de la configuración de haces más básica (1+6).
- Finalmente se deberá de ampliar la distancia de la primera corona para compensar las caídas de las zonas más alejadas del centro. Esto se debe a que dichos puntos sufren unas mayores pérdidas debido a las pérdidas por espacio libre y a las pérdidas por sombras de edificios.

Antes de proceder con las simulaciones se requiere una explicación de las mismas. En esta ocasión y a modo de no repetir gráficas ni resultados similares a los de la banda de frecuencia de 3.5 GHz, no se van a realizar las simulaciones de forma independiente. En su lugar, se mostrarán los resultados para las condiciones más adversas. Con ello, se hace referencia a la situación más adversa de estabilidad de la plataforma (23 kilómetros), considerando las pérdidas por sombra, lluvia y niebla. Con todo esto, a continuación se muestran los resultados obtenidos para las dos configuraciones mencionadas anteriormente y las diferentes potencias de transmisión posibles:

*1ª configuración (haz principal + 8 haces en la primera corona)*

**Figura 34: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+8).**

Como se puede apreciar en la imagen, la primera corona ha sido desplazada hasta los quince kilómetros para conseguir una cobertura más uniforme. De esta forma se ha obtenido una relación de señal a ruido óptima para una distancia de cobertura mayor de 20 kilómetros.

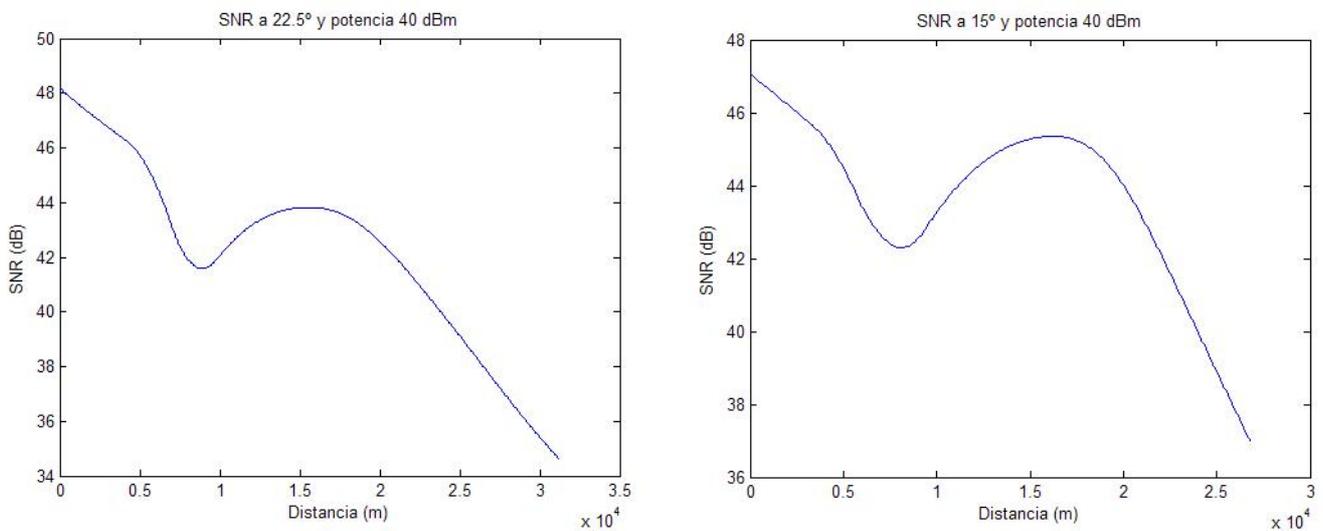
*2ª configuración (haz principal + 12 haces en la primera corona)*

**Figura 35: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+12).**

### CONCLUSIONES A 5 GHz

En la simulación del sistema a 5 GHz cabe destacar el fuerte decremento de la SNR recibida debido a las pérdidas extra introducidas por el sistema al trabajar en dicha banda. Sin embargo, los amplios márgenes con los que se contaban en la anterior banda han supuesto unos resultados que continúan siendo satisfactorios. Por este motivo solamente se ha procedido a la representación de los datos en las peores circunstancias posibles.

Por otra parte debido a la gran diferencia de relación en los puntos con mayor y menor cobertura, las representaciones dan un concepto global de las SNR recibidas pero sin mucho detalle. Por ello y tal y como se procederá en las diversas simulaciones a mayor banda de frecuencia se procederá a mostrar un perfil de la SNR recibida en los ángulos críticos de las distintas configuraciones. Dichos ángulos corresponden a aquellos en los que pasan por un mínimo en la primera corona. Según esto se procede a mostrar dichos perfiles para lados configuraciones anteriormente simuladas (1+8 y 1+12 respectivamente) para la máxima potencia de transmisión (40 dBm):



**Figura 35: Perfil SNR para los ángulos críticos para las configuraciones (1+8) a la izquierda y (1+12) derecha.**

Cómo es evidente la configuración (1+12) supone una mayor SNR recibida en su conjunto debido a la menor cantidad de espacio entre haces. Por ello y con el objetivo de maximizar la posible tasa binaria de transmisión, se optaría por dicha configuración.

### **3.6.3 Análisis WiMAX a 28 GHz**

En este tercer gran bloque de simulaciones se va a analizar la viabilidad del sistema HAP para desplegar una red WiMAX en las frecuencias de trabajo originalmente asignadas para esta tecnología. Es imprescindible recordar las dos principales restricciones que supone el aumento de frecuencia de funcionamiento:

- La propagación de la señal sufrirá unas mayores pérdidas debido al aumento de la distancia eléctrica que sufre la señal (o pérdidas de propagación por espacio libre) y las relacionadas con la lluvia ( $k_h=0.175, \alpha_h=1.23$ ).
- En segundo lugar, las potencias de transmisión del sistema están muy limitadas debido dicha frecuencia de trabajo. En las simulaciones que se presentarán a continuación se trabaja con dos potencias de 2.5 Vatios y otra de viabilidad futura de 5 Vatios.

Por ello, es necesario aumentar buscar una solución, que permita mantener una cierta SNR (que será muy inferior a la de las otras bandas de trabajo) lo más uniformemente posible a lo largo del área de servicio. En este sentido, se va a proceder a realizar las simulaciones para las ya mencionadas potencias de transmisión y dos configuraciones de haces potentes. Por una parte, se utilizara un núcleo central con una corona de doce haces (1+12) y por otra se implementará un sistema de dos coronas con seis haces en la primera y doce en la segunda (1+6+12).

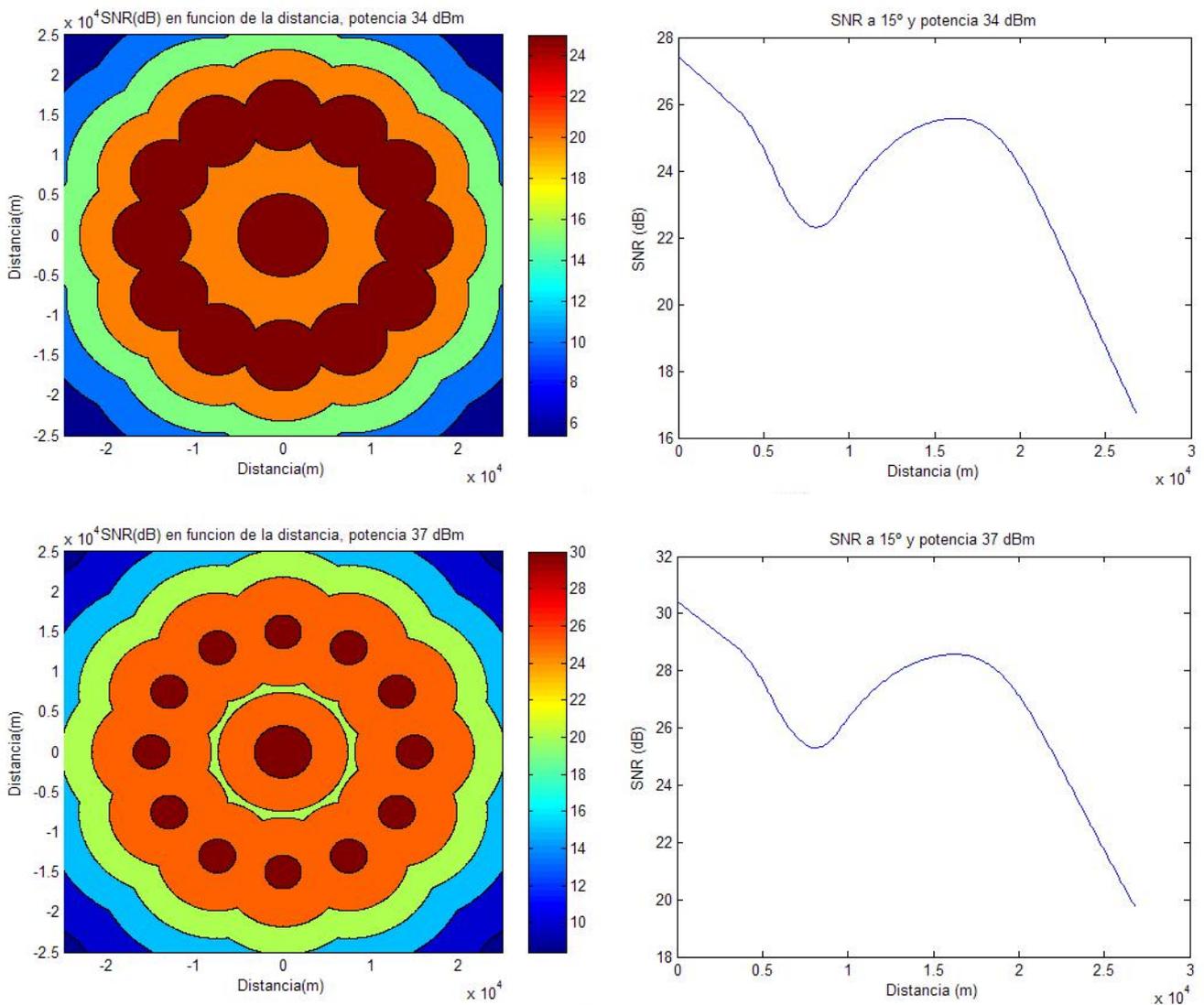
Debido a la alta frecuencia, los resultados incluyen las pérdidas por lluvias y masas nubosas con las mismas características teóricas que se consideraron en el apartado anterior.

En esta ocasión y a modo de observar los efectos de las distintas características en el sistema se va a proceder a mostrar los resultados mencionados en simulaciones independientes.

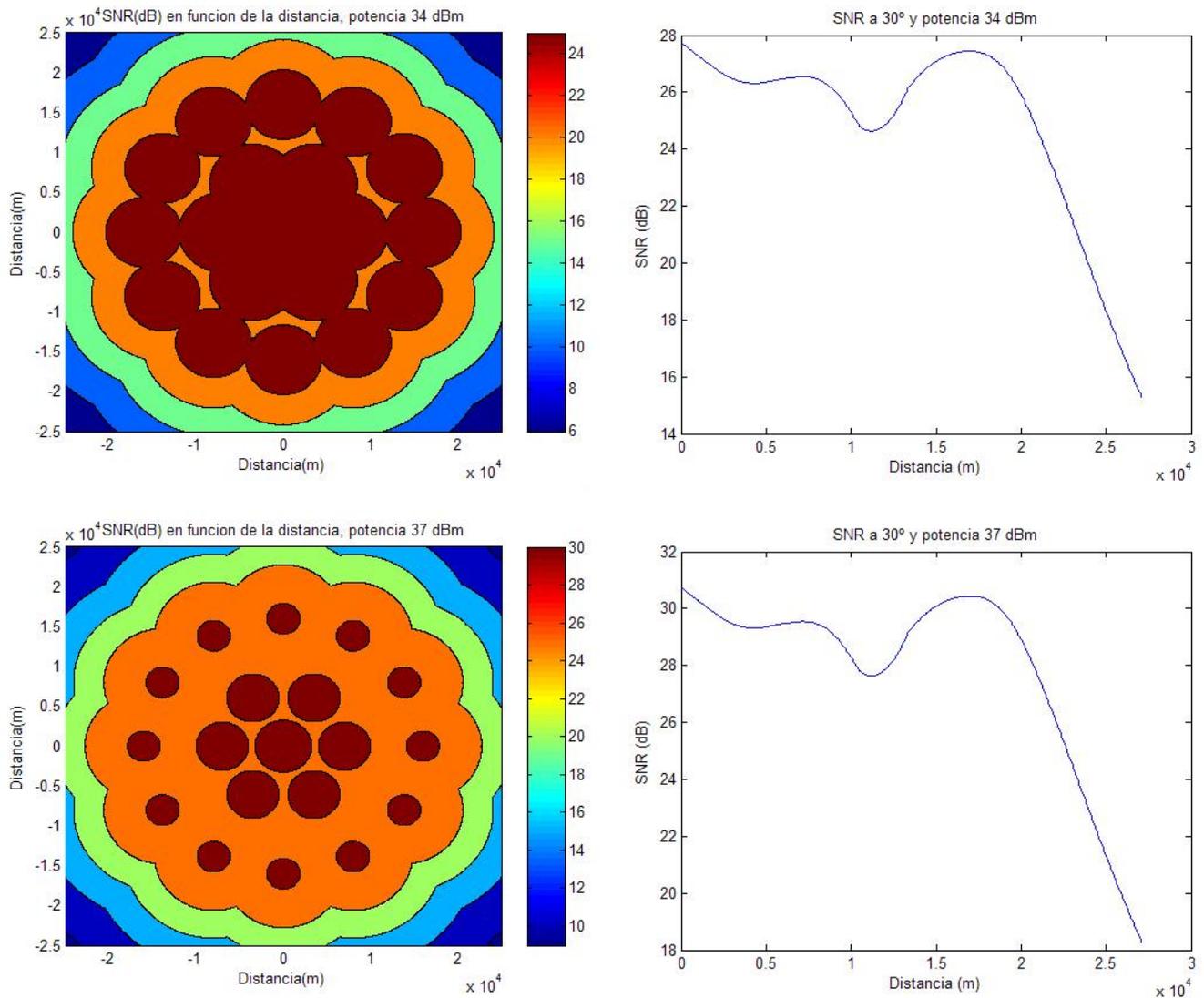
**1ª Simulación: SNR vs POTENCIA DE TRANSMISIÓN**

En esta primera simulación, se van a mostrar los resultados para las distintas potencias de transmisión y configuraciones del sistema. Sin embargo, en este simulación no se consideran las diferentes alturas posibles de la plataforma, ni las pérdidas por desvanecimientos por sombra.

*1ª configuración (haz principal + 12 haces en la primera corona)*



**Figura 36: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+12).**

*2ª configuración (haz principal + 6 haces en la primera corona + 12 en la segunda)*

**Figura 37: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+6+12).**

En esta ocasión se ha tomado una distancia entre las coronas de siete kilómetros para la primera y diecisiete para la segunda. De esta forma se ha obtenido un área bastante con una relación de señal a ruido bastante uniforme.

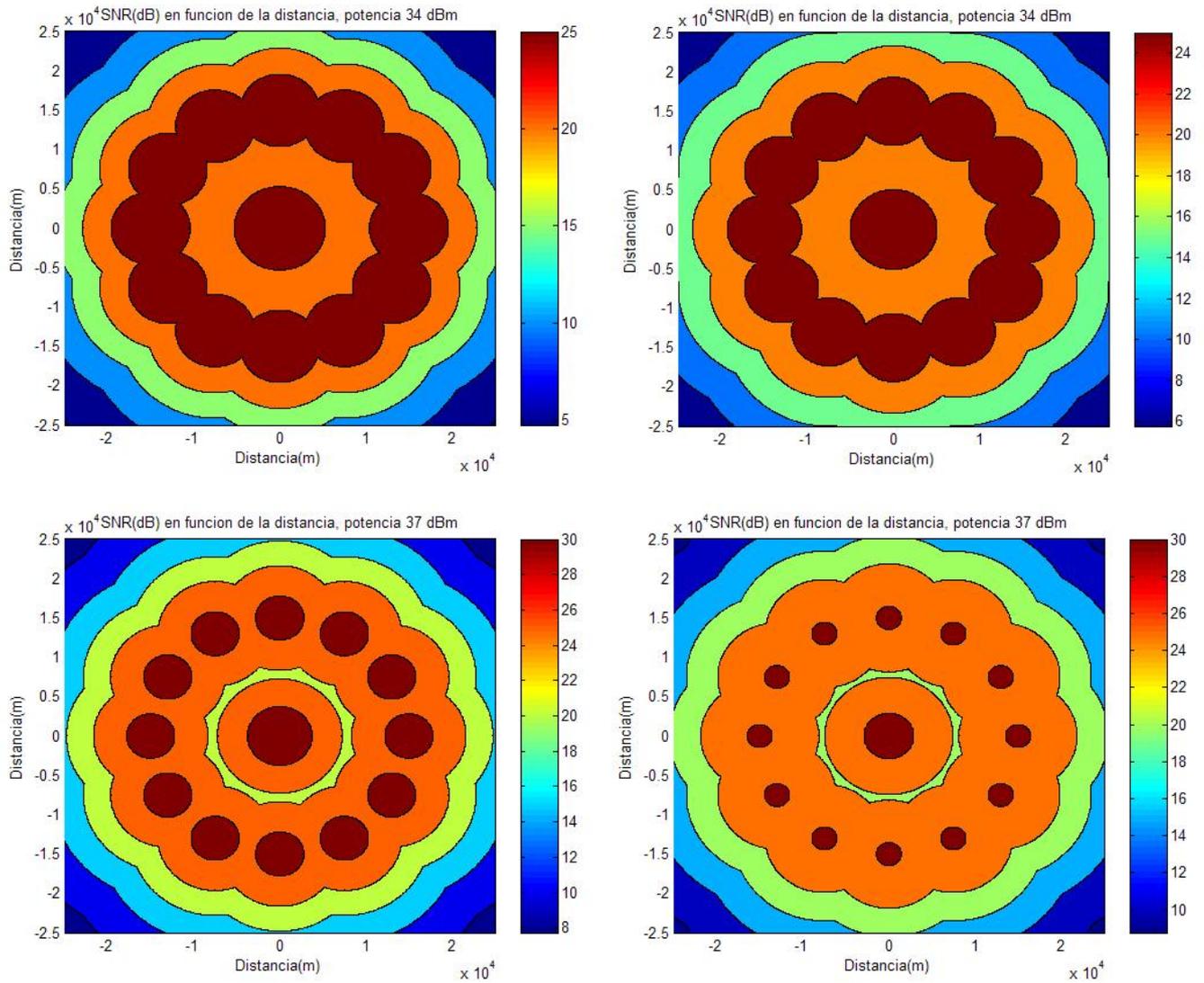
### **2ª Simulación: SNR vs ESTABILIDAD DEL HAP**

En la siguiente simulación se va a observar los fenómenos producidos por los cambios de posición en la altura de la plataforma. El sistema de presentación de las simulaciones será como el del bloque anterior sin mostrar el perfil de SNR recibida.

*1ª configuración (haz principal + 12 haces en la primera corona)*

**ALTURA DEL HAP 20 Km**

**ALTURA DEL HAP 23 Km**

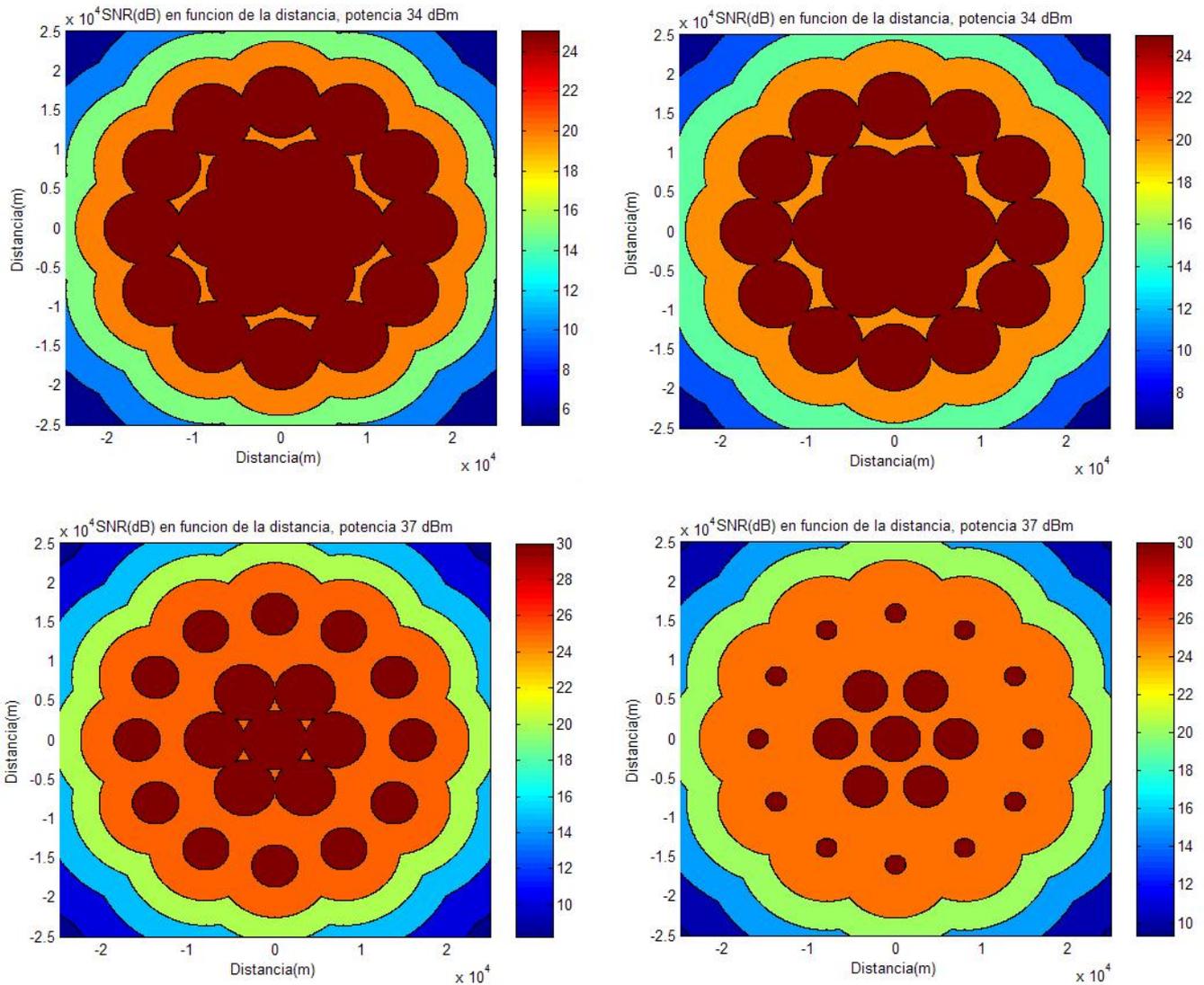


**Figura 38: SNR recibida en función de las potencias de transmisión y altura (conf. 1+12).**

*2ª configuración (haz principal + 6 haces en la primera corona + 12 en la segunda)*

**ALTURA DEL HAP 20 Km**

**ALTURA DEL HAP 23 Km**



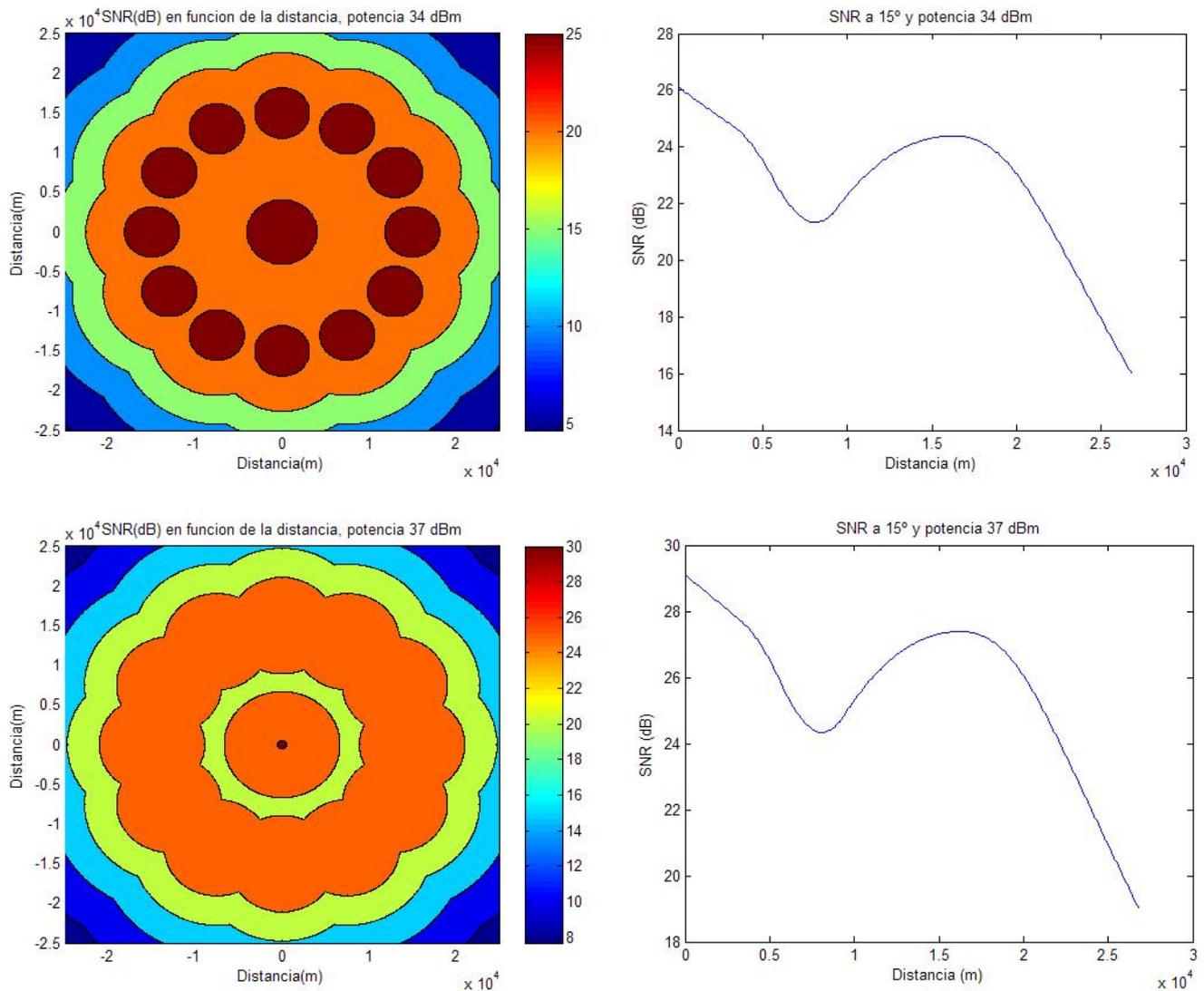
**Figura 39: SNR recibida en función de las potencias de transmisión y altura (conf. 1+6+12).**

Al igual que ha sucedido a lo largo de todo el proyecto, las relaciones señales a ruido disminuyen a medida que la plataforma se eleva. Por ello, en la tercera simulación tomaremos dicha altura como factor más adverso y así garantizar el servicio para las distintas alturas de la plataforma.

### 3ª Simulación: MÁRGENES POR SOMBRA

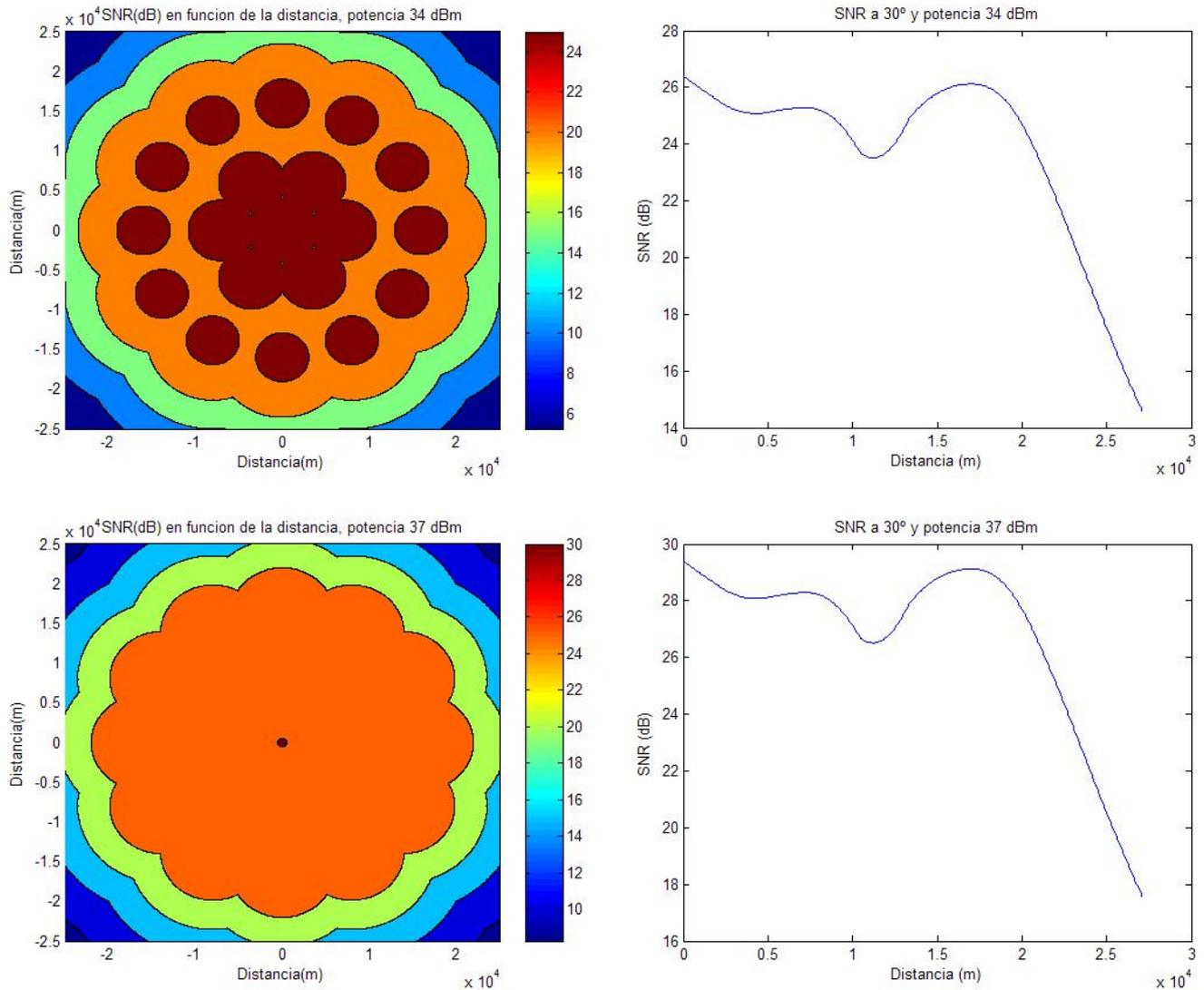
Finalmente y una vez observado los principales factores que condicionan la adecuada recepción de la señal, se dispone a exponer los resultados teniendo en cuenta los ya obtenidos parámetros. En concordancia pues, se mostrarán los datos para la máxima altura de la plataforma, incluyendo todas las pérdidas anteriores y añadiendo los desvanecimientos por sombra.

#### 1ª configuración (haz principal + 12 haces en la primera corona)



**Figura 40: SNR con Msombra recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+12).**

*2ª configuración (haz principal + 6 haces en la primera corona + 12 en la segunda)*



**Figura 41: SNR con Msombra recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+6+12).**

**CONCLUSIONES A 28 GHz**

Una vez realizadas las simulaciones del sistema a una frecuencia de operación a 28 GHz, se observa el aumento de complejidad para la viabilidad técnica del proyecto. En este sentido y como ya se ha comentado, el aumento de la frecuencia supone los siguientes cambios respecto a las frecuencias anteriores:

- Introducción de 17 y 15 decibelios (respecto a 3.5 y 5 GHz respectivamente) de pérdidas de propagación por espacio libre.
- Las pérdidas por lluvia se disparan de 0.3 decibelios para la frecuencia de 5 GHz a 4 ó 5 decibelios a 28 GHz
- Imposibilidad de utilizar amplificadores de potencia a altas frecuencias por lo que tenemos unas pérdidas añadidas de 4 a 7 decibelios.

Con esta disminución de decibelios, la relación señal a ruido recibida sufre un descenso considerable respecto a las bandas de frecuencia anteriormente estudiadas. Para apaciguar dicha caída se ha introducido nuevas configuraciones de haces que dan lugar a zonas de cobertura más uniformes.

En un balance global del sistema, se ha demostrado que la opción de WiMAX sobre HAPs para una frecuencia de 28 GHz es viable. En relación con los anteriores apartados y debido a la caída de SNR sufrida, queda evidenciado que se hará necesario disminuir la modulación por portadora. Por ejemplo y dado que quedan garantizados valores de SNR cercanos a 25 decibelios se optará por una modulación de 64-QAM en lugar de los 512-QAM en la banda de 5 GHz.

En el apartado número cinco del proyecto sobre características de los elementos de transmisión, se adjuntará una hoja técnica sobre un fabricante que comercializa amplificadores de potencia para la banda de 28 GHz con potencias de hasta cuatro Vatios. Por ello la opción de transmisión a cinco Vatios (37 dBm) que se ha simulado en este proyecto, será una opción viable en un corto periodo de tiempo.

### **3.6.4 Análisis WiMAX a 50 GHz**

En este último bloque de simulaciones y dado que el uso de dispositivos para las bandas de frecuencia superiores a los 30 Giga Hertzios se encuentra limitado, se estudiará dichas bandas como una opción de futuro. Empresas punteras en la creación y distribución de amplificadores de potencia y dispositivos de radiofrecuencia en general como MITEQ y JCA, están trabajando para obtener dispositivos de alta fidelidad para frecuencias muy altas (mayores de 30 GHz). Las pérdidas que introducen dichos dispositivos son muy elevadas y requieren de líneas de transmisión muy complejas. En lo que ha este proyecto se refiere, se va a simular la viabilidad del sistema para una frecuencia de 50 Giga Hertzios suponiendo una potencia de transmisión de 2.5 Vatios (34 dBm). Debido a que las pérdidas de propagación y lluvia se elevarán de nuevo a valores muy elevados, se simulará solamente para una configuración de dos coronas la primera con seis haces y la segunda con doce (1+6+12).

Sin embargo, el uso de dichas bandas de frecuencia milimétrica con la característica de cuasi LOS de nuestro sistema, da lugar a la fabricación de antenas muy especializadas. En este sentido, se puede construir antenas receptoras que alcancen los 50 decibelios de ganancia.

Dado que la frecuencia de funcionamiento ha sido incrementada hasta los 50 GHz se debe tener en cuenta los cambios oportunos. En relación con las pérdidas por lluvia las constantes para la polarización horizontal (la más adversa) se utilizarán los valores  $k_h=0.4$   $\alpha_h=0.9$ . Por otro lado, las pérdidas por niebla o masas nubosas se incrementarán hasta alcanzar los 1.5 decibelios.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente comentado, se obtienen los siguientes resultados:

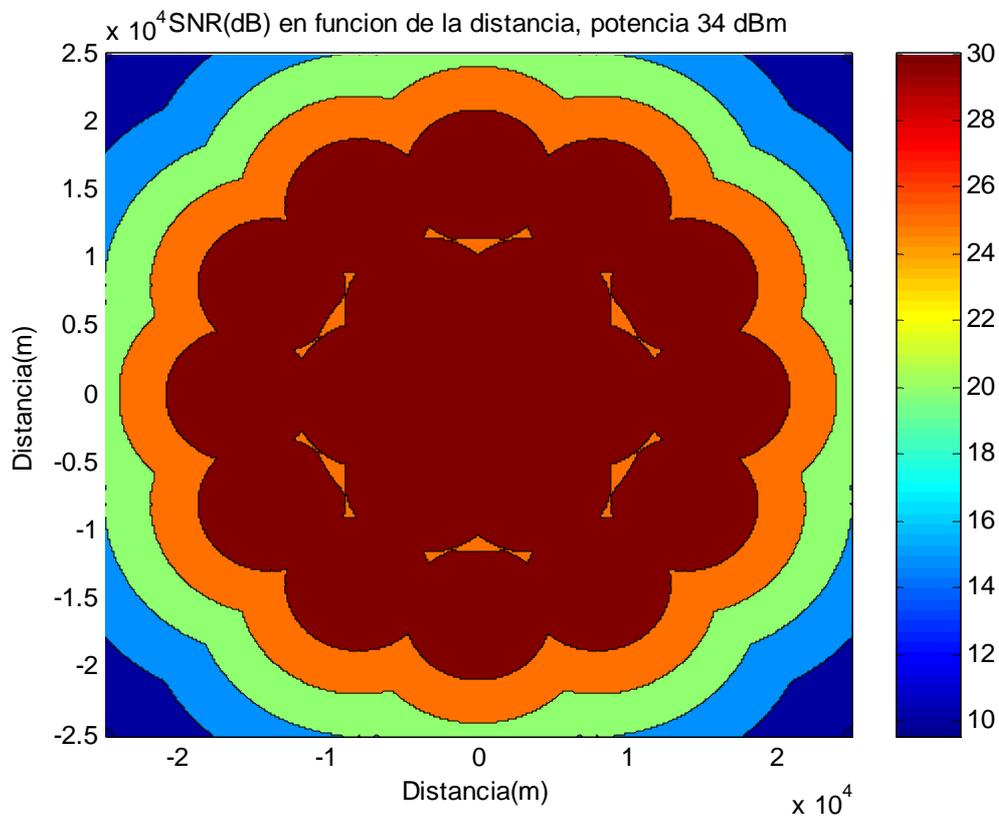
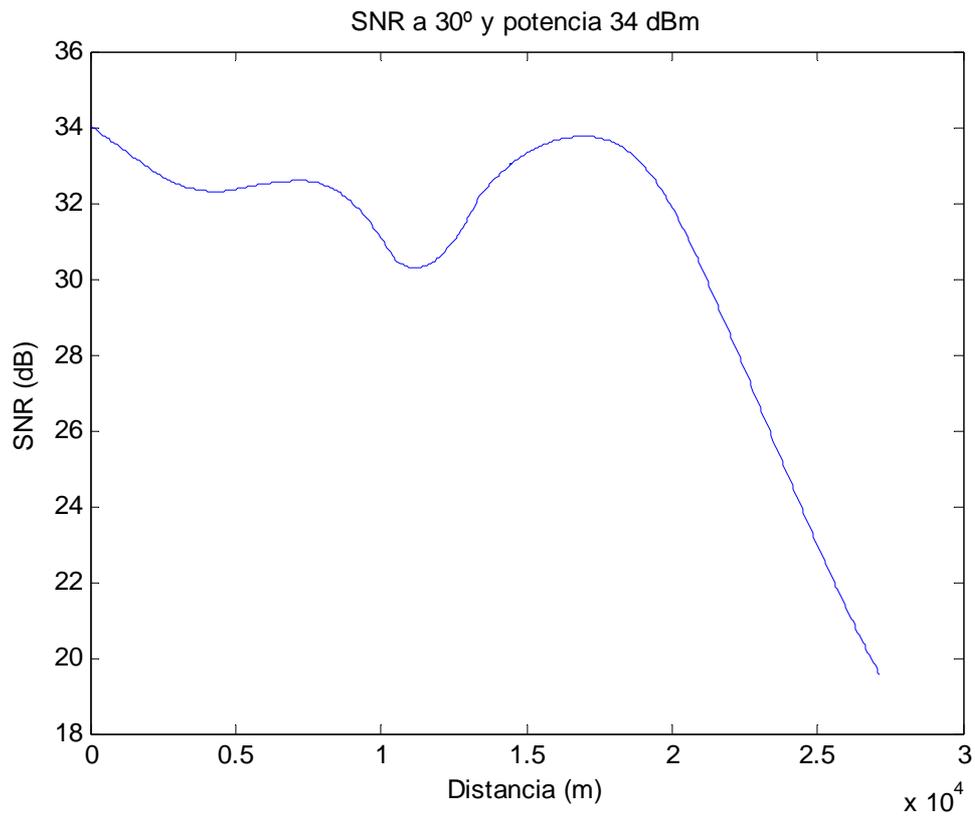


Figura 42: SNR recibida en función de las potencias de transmisión (conf. 1+6+12).

### **CONCLUSIONES A 28 GHz**

Tal y como se observan en los resultados, el incremento de las pérdidas por el uso de una frecuencia superior, ha sido compensado por la mayor ganancia de las antenas en recepción. Esto supone que para trabajar en dichos rangos de frecuencia se requiere de un avance tecnológico para lograr la potencia de transmisión simulada y un aumento de los costes debidos tanto a los propios elementos utilizados como al diseño de nuevas antenas.

A pesar de estos inconvenientes, queda demostrada la viabilidad del sistema para las aplicaciones WiMAX desde HAPs a altas frecuencias en un marco de futuro no muy lejano.

### **3.7 Análisis de las simulaciones**

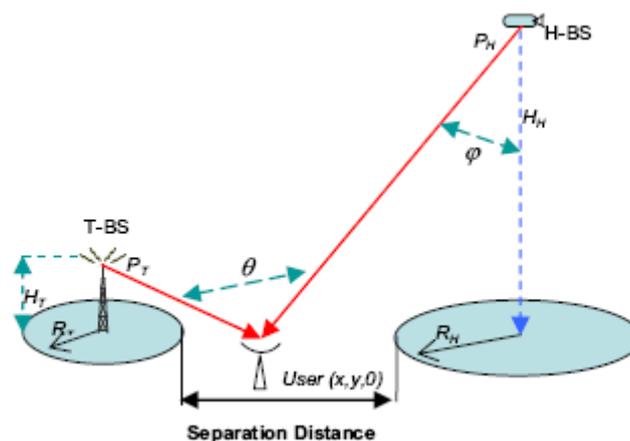
A lo largo de los cuatro bloques de simulaciones realizados, se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

1. El sistema WiMAX mediante plataformas aéreas a gran altitud supone una opción potente y viable desde el punto de vista de análisis de la señal.
2. La banda de funcionamiento del sistema es tan amplia como el mercado sea capaz de distribuir los dispositivos para la frecuencia necesaria. Es evidente que aunque inicialmente las frecuencias más bajas ofrecen mejores prestaciones, con el avance de la tecnología dicha brecha disminuye.
3. Las tasas binarias que se pueden obtener, demuestran que el sistema puede ser un gran competidor de otras tecnologías.
4. La estabilidad de la plataforma es un parámetro a tener en cuenta pero no excesivamente crítico si es controlado dentro de unos márgenes. En adicción, el incremento de altura es más restrictivo que la bajada de la misma, sobretodo en altas frecuencias.

5. Las distintas configuraciones de los haces se utilizarán para obtener las relaciones de señal a ruido necesarias. Siendo mayor el número de haces para bandas de frecuencia más altas debido a la disminución de su potencia de transmisión y mayores pérdidas.

### **3.8 Convivencia WiMAX terrestre y WiMAX mediante HAPs**

Una vez llegados a este punto de desarrollo del bloque WiMAX ha quedado probada la viabilidad del sistema para ofrecer el servicio deseado a través de los HAPs. Sin embargo y tal y como se ha expuesto en los apartados teóricos la tecnología WiMAX representa una opción promesa para las comunicaciones última milla de acceso inalámbrico. Ello ha llevado a numerosos estándares en relación con ella y a los primeros despliegues de la misma. En este sentido y dado que el sistema WiMAX estaba inicialmente concebido para sistemas con estaciones base terrestres es necesario tener en cuenta las interferencias que podrían producirse. En la siguiente figura se presenta el esquema básico de un sistema WiMAX mediante HAPs y mediante un despliegue terrenal convencional.



**Figura 43: Sistema WiMAX mediante HAP y medio terrestre.**

Como se ha expuesto a lo largo de todo el bloque del servicio WiMAX y en particular en el apartado de enclave de frecuencias, uno de los aspectos críticos del sistema

vendrá dado por la interferencia que se produce entre ambas señales. Dicha interferencia tiene un carácter mutuo.

La orientación del sistema mediante estaciones terrestres era inicialmente una comunicación NLOS con el amplio rango de frecuencias de 2-66 GHz. Sin embargo y dado el interés de aplicar dicha tecnología para terminales móviles con un servicio NLOS las bandas de funcionamiento de los más recientes protocolos se encuentra entre los 2-11 GHz. En concordancia con esto, se ha demostrado a lo largo de las simulaciones los buenos resultados de implementar WiMAX mediante HAPs a bajas frecuencias para obtener elevadas tasas binarias. Es por ello, que ambos sistemas compiten por el dicho bien cada vez más escaso.

Por otra parte y en relación con la convivencia de ambos sistemas, existen un cierto número de parámetros que resultarán clave para la obtención de los resultados. Dichos factores son principalmente la potencia de transmisión, el ancho de banda de las antenas, el modelo de propagación y el nivel de interferencia térmico. Algunos de los valores más representativos de dichos parámetros para los ambos sistemas son mostrados a continuación:

<b>Parámetro</b>	<b>Sistema HAP</b>	<b>Sistema Terrestre</b>
<b>Radio de cobertura</b>	Hasta 25 kilómetros	7 kilómetros
<b>Altura del transmisor</b>	20 kilómetros	30 metros
<b>Potencia de transmisión</b>	40 dBm	
<b>Ganancia de la antena</b>	15 dB	7 dB
<b>Tasa de Roll off</b>	3.3	-
<b>Eficiencia de la antena</b>	80 %	
<b>Altura del receptor</b>	15 metros	1-10 metros
<b>Frecuencia</b>	3.5 GHz	
<b>Ancho de banda de canal</b>	Escalable de 1-20 MHz	
<b>Potencia de ruido</b>	-100 dBm	

**Tabla 12: Valores característicos de los sistemas WiMAX por HAP y terrestres.**

Modelos de propagación

Una de las principales características del sistema HAP era que debido a su gran altura la comunicación es generalmente de visión directa (LOS). En sintonía a ello se ofrecía un modelo de propagación basado principalmente en pérdidas por espacio libre. Por otra parte las ganancias de las antenas venían dadas por una ganancia máxima ponderada por un factor en forma de coseno elevado a una constante. En este sentido se recuerdan dichas expresiones:

$$L_{fs} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \qquad G(\alpha) = G_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\alpha)^n$$

Al realizar el análisis de propagación del sistema mediante estaciones base terrestres el modelo a aplicar no es el mismo por lo que se requiere especificar las ecuaciones que lo modelan. En este sentido cabe destacar que debido a la menor altura de los transmisores, se produce una comunicación de no visión directa que dependerá principalmente del entorno y la frecuencia de funcionamiento. Dada que la banda frecuencia de trabajo (3.5 GHz) es mayor que 2 GHz no se podrá utilizar los modelos de propagación de Hata-Okumura. Por ello, se ha propuesto tomar el modelo de pérdidas urbano que viene dado por la siguiente expresión:

$$L_T = \bar{L}_{fs} + \Delta h_{antRX} + \Delta f \qquad \text{Ecuación 12.}$$

Dónde  $\bar{L}_{fs}$  son las pérdidas medias de propagación,  $\Delta h_{antRX}$  es el factor de corrección de la altura de la antena receptora y  $\Delta f$  es el factor de corrección por frecuencia utilizada. Dichos términos son evaluados con las expresiones que se muestran a continuación:

$$\bar{L}_{fs} = L_{fs} + 10 \cdot \gamma \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s$$

$$\Delta h_{antRX} = 6 \cdot \log(f / 2000)$$

$$\Delta h_{antRX} = -10.8 \cdot \log(h / 2)$$

En estas expresiones:

- 's' es el margen por sombra
- $\gamma = a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b}$  donde  $h_b$  es la altura de la estación base y a, b y c dependen del tipo de terreno.
- D es la distancia entre transmisor y receptor con una  $d_0=100$  metros.

A continuación y debido a la dependencia del sistema WiMAX terrenal con el entorno, se muestra la tabla de valores de las variables y constantes en función del tipo de terreno.

Variable	Tipo A	Tipo B	Tipo C
A	4.6	4	3.6
B	0.0075	0.0065	0.0050
C	12.6	17.1	20
S <sub>90%</sub>	10.6 Db	9.6 dB	8.2 dB

**Tabla 13: Constantes del tipo de terreno para WiMAX terrestre.**

Los tipos de terreno se diferencian en:

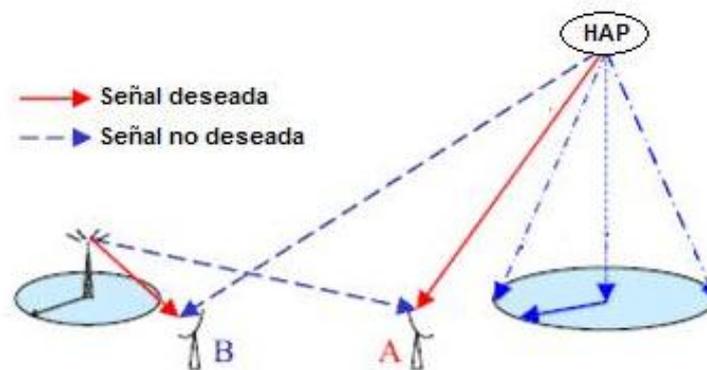
- Tipo A: Muchas colinas y árboles de gran altura
- Tipo B: Terreno intermedio con árboles de mediana envergadura
- Tipo C: Terreno plano con densidad y altura de árboles baja

El modelo propuesto es válido para una estación base con altura entre 10 y 80 metros. Por otra parte las alturas de los receptores suelen situarse en torno a los 2 a 10 metros.

En la simulación que se realizará a modo de representar la interferencia, se ha considerado un tipo de terreno intermedio, es decir los parámetros introducidos por el terreno tipo B.

Situación y Análisis

Una vez propuestos los diferentes modelos de propagación se deberán obtener las diferentes relaciones señales a ruido, a interferencia y a ambas a la vez para los dos posibles escenarios. Uno será cuando el HAP interfiera con el sistema terrenal y viceversa. Ambos escenarios son escenificados en la imagen que se expone acto seguido:



**Figura 44: Posibles casos de interferencia entre HAP y estaciones terrestres.**

Con estos dos posibles escenarios y teniendo en cuenta los parámetros anteriormente estudiados sobre los modelos de propagación utilizados, tendremos las siguientes expresiones de SNR, SINR e INR (en unidades naturales):

Interferencia del sistema HAP para la señal terrestre (B)

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_{txT} \cdot G_{antTX}(\alpha) \cdot G_{antRX} \cdot L_T}{N}$$

$$SINR = \frac{S}{N + I} = \frac{P_{txT} \cdot G_{antT}(\alpha) \cdot G_{antRX} \cdot L_T}{N + P_{txH} \cdot G_{antH}(\alpha) \cdot G_{antRX}(\theta) \cdot L_{fs} \cdot M}$$

$$INR = \frac{I}{N} = \frac{P_{txH} \cdot G_{antH}(\alpha) \cdot G_{antRX}(\theta) \cdot L_{fs} \cdot M}{N}$$

**Ecuación 13.**

Interferencia del sistema terrestre en la señal HAP (A)

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_{txH} \cdot G_{antTX}(\alpha) \cdot G_{antRX} \cdot L_{fs} \cdot M}{N}$$

$$SINR = \frac{S}{N + I} = \frac{P_{txH} \cdot G_{antTX}(\alpha) \cdot G_{antRX} \cdot L_{fs} \cdot M}{N + P_{txT} \cdot G_{antTX}(\alpha) \cdot G_{antRX} \cdot L_T}$$

$$INR = \frac{I}{N} = \frac{P_{txT} \cdot G_{antTX}(\alpha) \cdot G_{antRX} \cdot L_T}{N}$$

**Ecuación 14.**Resultados

Como se puede observar en las expresiones que se dan anteriormente, el sistema HAP posee antenas directivas muy potentes. Esto produce que la interferencia del sistema terrestre sea mínima en comparación con la del sistema HAP produciendo una interferencia muy leve.

Por otra parte la señal procedente del sistema HAP incide en el receptor WiMAX terrestre (hipotéticamente omnidireccional) con una potencia muy baja. Al ser de mucha menor ganancia la antena del sistema, dicha señal produce una interferencia muy leve sobre el sistema terrestre. Además si las antenas receptoras del sistema WiMAX terrestre son direccionales la interferencia disminuye aún más.

Por otra parte y en relación a ambas interferencias mutuas que se producen entre ambos sistemas, se deberá de manejar la situación en términos de bandas de frecuencia utilizadas para disminuir al máximo la misma.

Conclusiones

Como se ha señalado la viabilidad del sistema para funcionar conjuntamente, supone un mero esfuerzo durante la planificación. El hecho de que las antenas receptoras sean orientadas hacia el transmisor facilita un filtrado espacial de la señal. Por otra parte

los sistemas HAPs sufren menor interferencia debido a las condiciones más óptimas de propagación (LOS).

Por tanto es posible intuir la viabilidad de la convivencia de ambos sistemas, siempre y cuando no interfieran directamente en sus regiones de cobertura más importantes.

### **3.9 Conclusiones**

A lo largo de este capítulo de WiMAX sobre HAP se ha estudiado la viabilidad técnica del proyecto en función de la potencia de transmisión, bandas de frecuencia y características técnicas más relevantes. Se ha demostrado que el sistema es mucho más potente y robusto en situaciones de bandas de frecuencia baja donde el espectro es muy limitado.

No obstante, se ha conseguido probar la viabilidad técnica para más altas frecuencias (recursos más abundantes) mediante la implantación de nuevos sistemas de coronas y reducción de las prestaciones globales del sistema (modulación QAM menos potente).

Por tanto y comparando con las tecnologías introducidas al inicio se presenta WiMAX como una tecnología con un elevado potencial con gran capacidad de oferta de servicios. Esta unida con las características de rápido despliegue y viabilidad técnica de las redes mediante HAPs hacen del sistema global una gran solución para las comunicaciones de banda ancha.





## 4 CAPÍTULO 4: INGENIERÍA Y ELEMENTOS CLAVE

A lo largo de este proyecto, se ha demostrado la viabilidad de ofrecer los servicios de televisión digital y WiMAX mediante HAPs. Sin embargo, dicha viabilidad se encuentra condicionada a aspectos de ingeniería de distinta índole. En este sentido, es indispensable realizar un estudio sobre la disponibilidad y momento actual tecnológico de los distintos dispositivos y elementos que forman el sistema. A continuación va a ofrecerse un estudio sobre los amplificadores y las antenas que pueden encontrarse en el mercado para cumplir lo supuesto durante las simulaciones.

### CADENA DE TRANSMISIÓN

Como cualquier sistema de telecomunicaciones nuestro sistema está formado por un transmisor y un receptor. El bloque transmisor es el más complejo debido a que se tiene que generar una potencia mínima de transmisión para que se pueda recibir la señal. El transmisor está formado por cinco bloques principales: señal de información, modulador, mezclador, amplificador de radio frecuencia y antena transmisora. Entre las diferentes etapas suele haber una serie de filtrados y amplificadores de baja frecuencia para mejorar el rendimiento del sistema. El siguiente diagrama de bloques representa un transmisor básico heterodino:

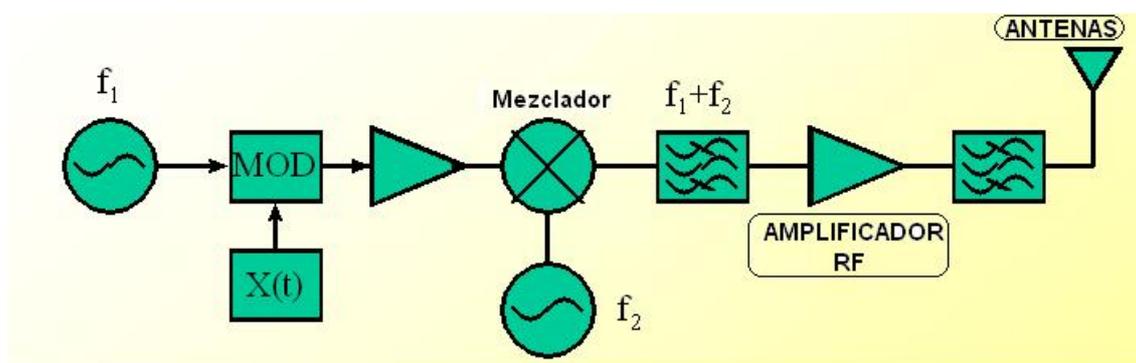


Figura 45: Diagrama de bloques de un transmisor general básico.

La capacidad de obtención de los distintos dispositivos viene dada por su complejidad y la viabilidad de obtener unas características técnicas concretas. Así pues, los

bloques más complejos corresponden al amplificador de radiofrecuencia y a las antenas. Los osciladores se encuentran muy desarrollados para el ámbito de frecuencia en el que se ha trabajado en el proyecto. Por otra parte, los mezcladores pueden obtenerse mediante varias etapas y no muy complejas, por lo que tampoco suponen un factor determinante. En relación con los filtros, siendo precavido a la hora de usar los mezcladores y no exigiendo caídas muy abruptas sobretodo en altas frecuencias, no supondrán un mal mayor.

#### **4.1 Amplificadores de potencia**

Tal y como se ha destacado a lo largo del proyecto y en especial en el bloque de WiMAX sobre HAPs, la potencia de transmisión condiciona cualquier tipo de proyecto de telecomunicaciones. Ha de ser resaltado que la amplificación de la potencia de transmisión vendrá dada en la etapa anterior al proceso de radio difusión a través de la antena. Por lo tanto, dichos amplificadores están condicionados a la frecuencia de trabajo correspondiente a cada una de las posibles bandas de funcionamiento.

Dado que las modulaciones utilizadas (QAM) se caracterizan y distinguen por la potencia y fase de cada símbolo, es necesario que las etapas de amplificación sean lineales. Este aspecto condiciona las prestaciones de los mismos, así como su viabilidad y costes. Dentro del rango de frecuencias cercanas a los pocos Giga Hertzios la tecnología se encuentra muy desarrollada, encontrándose fabricantes de distinta índole y características muy variadas. La relación calidad coste que debe de mantenerse para obtener unos óptimos resultados, decantarán la elección de cada suministrador. Así pues, para dichas frecuencias, fabricantes como MITEQ y JCA ofrecen dispositivos muy variados para ser adquiridos desde su página web.

Sin embargo, tal y como se había adelantado en las simulaciones de WiMAX, la situación es muy dispar a la hora de aumentar la banda de frecuencia utilizada. Para frecuencias cercanas a los 28 GHz la posibilidad de encontrar amplificadores de hasta 5 Vatios es muy remota.

A continuación, en la Tabla 14, se muestra una tabla con valores representativos sobre los tipos de amplificadores y sus correspondientes potencias de transmisión en función de la frecuencia de trabajo.

Frecuencia	Componentes de estado sólido ( $P_{salida}$ )	Válvulas de vacío ( $P_{salida}$ )
	1 GHz	50 Vatios
3 GHz	30 Vatios	20 KVatios
10 GHz	10 Vatios	10 KVatios
30 GHz	1 Vatio	10 KVatios
50 GHz	700 mVatios	1 KVatio
100 GHz	300 mVatios	100 Vatios

**Tabla 14: Potencia de salida de amplificadores en función de la frecuencia.**

Dentro de la banda cercana a los 30 GHz, para la transmisión en 28 GHz, se han encontrado varios dispositivos útiles. En la documentación sobre hojas técnicas de productos se adjunta dos amplificadores: el TGA4905 suministrado por Triquina que ofrece una potencia de 4 Vatios para la banda de trabajo de 25 a 31 GHz y el AMF-4B-26003100 suministrado por MITEQ con una potencia de salida de 5 Vatios para la banda de 26 a 31 GHz. A continuación se ofrece una imagen (Figura 46) de ambos dispositivos mencionados.



**Figura 46: Amplificadores de potencia para la banda de 28 GHz.**

Por último y como un estudio de tecnología futura se habla de amplificadores de mayor frecuencia. En el caso de que se desee utilizar bandas de frecuencia superiores a los 30 GHz como por ejemplo la de 50 GHz las potencia de transmisión son muy limitadas. En este caso los fabricantes punteros ya mencionados no ofrecen prestaciones que alcancen 1 Vatio de potencia de transmisión. En la simulación extra que se realizó en WiMAX para 50 GHz se supuso una potencia de transmisión de 2.5 Vatios (Figura 47). Dicho valor será accesible en el plazo de 3 ó 4 años en función del grado de avance de la tecnología. Además dicha aceleración vendrá potencia por la necesidad o no de utilizar dichas bandas de frecuencia por la escasez de otras bandas de frecuencia más baja.



**Figura 47: Amplificador para banda de frecuencia de 50 GHz.**

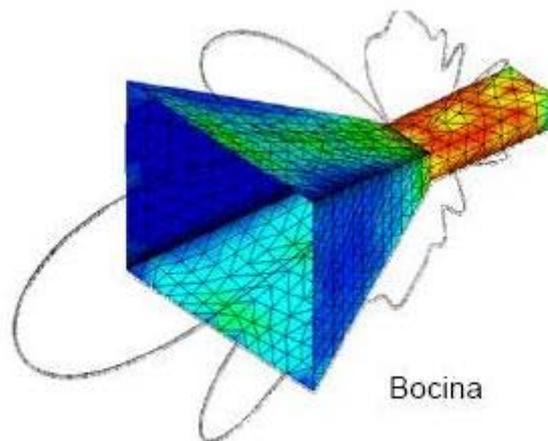
## **4.2 Antenas**

Una vez obtenidas las potencias de transmisión necesarias, se requiere de una antena que adapte esa potencia al medio de transmisión con un cierto diagrama de radiación y la máxima ganancia posible. En este sentido las antenas de los usuarios no suponen una gran complejidad, por lo que la elección de la misma vendrá dada en función del coste y la calidad del servicio que se desea proporcionar. En este sentido las antenas parabólicas convencionales (Figura 48) pueden suponer una económica vía para satisfacer ambos servicios.



**Figura 48: Antena parabólica convencional.**

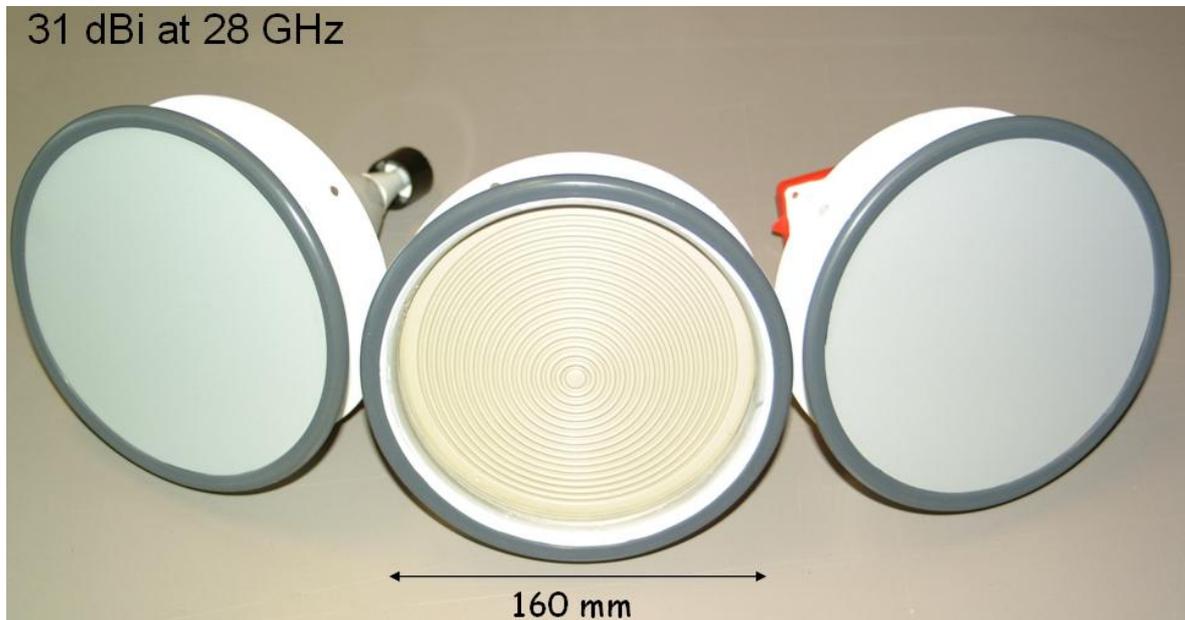
En el caso de las antenas transmisoras utilizadas por la plataforma, la complejidad aumenta cuantitativamente. En este apartado se va a centrar en el estudio de las antenas WiMAX convencionales debido a que son las más complejas. Para crear los diferentes haces es necesario basarse en el prototipo de una bocina (Figura 49). Este tipo de antena proporciona un diagrama de radiación muy concentrado y directivo ocupando poco espacio físico.



**Figura 49: Representación y diagrama de radiación de una antena bocina.**

Las configuraciones más complejas para este tipo de antenas están directamente relacionadas con la necesidad de adaptarlas a las altas frecuencia de operación. En dicho sentido para una frecuencia de 28 GHz y ganancias de transmisión próximas a 30

decibelios se obtienen unas antenas basadas en bocinas cómo las que se representan en la siguiente ilustración:



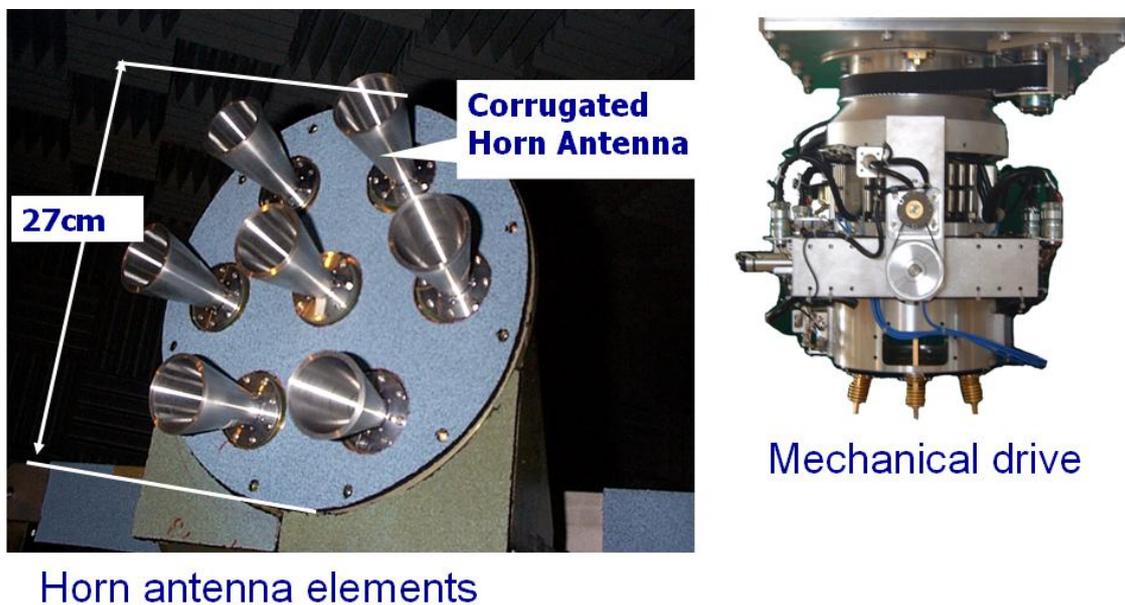
**Figura 50: Antenas a 28 GHz con una ganancia de 31 dB.**

Dichas antenas a diferencia de los amplificadores y antenas convencionales son fabricadas por encargo a una empresa especializada. En dicho sentido, las distintas configuraciones de haces y demás requerimientos de tamaño y ganancia son definidas en los requerimientos del encargo. Una vez estudiada la viabilidad elaborativa de dichas antenas su coste estará directamente relacionado con la precisión y los requerimientos tecnológicos que se precisan. Existen numerosos distribuidores y constructores de antenas para dichos márgenes de frecuencia y ganancia necesaria.

En las hojas técnicas sobre los dispositivos (parte final del proyecto) se han añadido un para informaciones sobre diferentes antenas dónde especifican algunas de los parámetros más característicos.

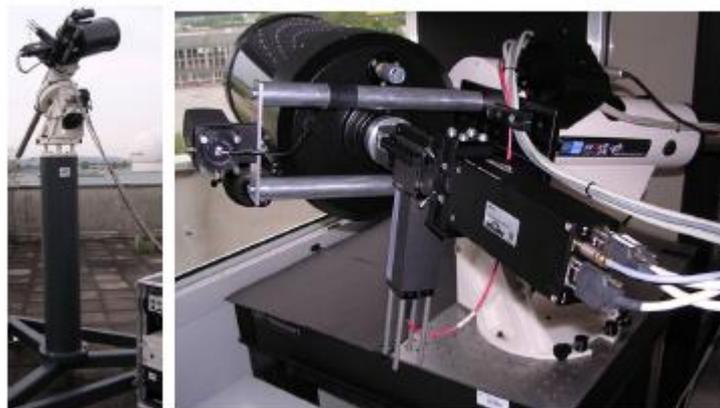
Por otra parte la industria se encuentra trabajando en antenas de mayor frecuencia basadas en bocinas pero con líneas de transmisión y adaptadores más complejos que introduzcan menos pérdidas. Se debe recordar que a dichas frecuencias las pérdidas de las líneas de transmisión convencionales son muy elevadas, lo que hace necesario trabajar con guías de onda y líneas microstrip muy precisas. A continuación en la Figura 51 se muestra

un ejemplo de dicha antena en uno de los proyectos más ambiciosos para dichas frecuencias:



**Figura 51: Futuras antenas a 48 GHz con varios haces.**

Por último y a modo de completar con el rango de antenas necesarias para la comunicación se muestra en la Figura 52 una estación transportables de fibra óptica. Dicha estación se encargaría del enlace ascendente entre tierra y HAP.



**Figura 52: Estación base terrenal para la conexión de HAPs y red de fibra óptica.**

### **4.3 Marcos de aplicación**

El objetivo de este último bloque es mostrar los posibles escenarios de implantación del sistema así como algunos ejemplos de desarrollos similares que se están llevando a cabo en diferentes países. El estudio se realizará en bloques y se propondrán los siguientes tres estudios:

- Sistemas HAPs como competidor de red de acceso de banda ancha en grandes ciudades.
- Implantación del servicio en lugares aislados o de difícil acceso para dar cobertura a grandes regiones (generalmente medio rural o costero).
- Aplicación militar de los HAPs: Comunicaciones de despliegue rápido tanto para guerras como desastres naturales.

#### Sistemas HAP en grandes ciudades

A lo largo de las simulaciones y como modelo de lugar de implantación se ha considerado la ciudad de Madrid. Generalizando a cualquier urbe desarrollada de grandes dimensiones, el panorama de implantación del sistema HAP se encuentra ante una serie de circunstancias. Principalmente estas son un número importante de clientes potenciales y en otro lugar una gran competencia de mercado. No obstante y a medida que avanza el tiempo, crece el optimismo de la implantación de un servicio HAP como competidor con el resto de las tecnologías. El principal escollo será la reducción de costes de inversión y de mantenimiento de las plataformas.

Por otra parte la cantidad de servicios otorgables en las grandes ciudades son muy numerosos y variados. Esto abre una puerta a la viabilidad del sistema y su posible aplicación para otros ámbitos debido a la reducción de costes del mismo.

Servicios más importantes otorgables en grandes ciudades:

- Difusión de vídeo digital.
- Comunicaciones de banda ancha e Internet.

- Servicios de telefonía.
- Backhaul o búcles de retorno.
- Comunicaciones 3G.
- Servicios eventuales (ante desastres naturales).

En algunos países como Corea del Sur y Japón han comenzado los primeros ensayos con dicha tecnología para usos civiles. En Corea la tecnología se conoce con el nombre de WiBro y viene desarrollado por la agencia KARI/ITRA.



**Figura 53: Programa Coreano KARI.**

En otros países como Japón también se están promocionando dichos servicios potenciado por su gobierno y diversas empresas Japonesas privadas con el nombre de NICT.

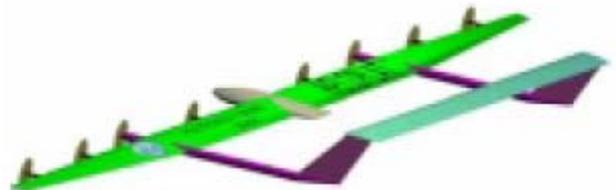
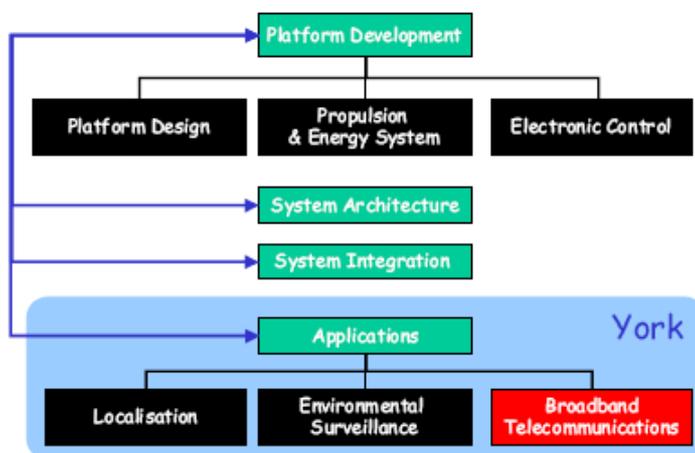


**Figura 54: Programa Japonés NICT.**

Sistemas HAP en regiones aisladas

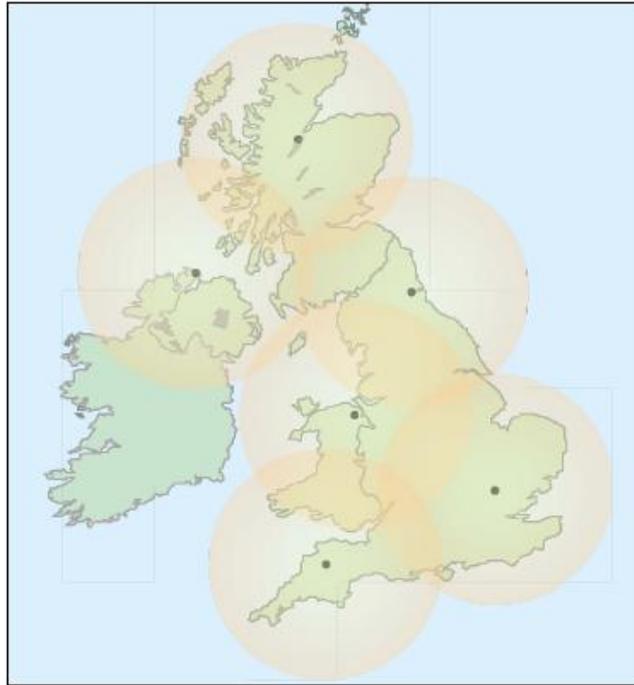
Cambiando de escenario se encuentra otros de los modelos de implantación más interesantes para la implantación del sistema HAP. En este caso el objetivo es otorgar un completo conjunto de servicios de telecomunicaciones para aquellas zonas que no disponen de ellas. Los servicios otorgables son los mismos que para el marco de aplicación en grandes ciudades. Sin embargo en un modelo de aplicación rural se requieren unas menores prestaciones del sistema en términos de tasas binarias y potencias de transmisión. Además se producen menores pérdidas por la menor densidad de edificios. En contrapartida la aplicación del sistema en medios rurales implica un mayor porcentaje de área cubierta. Para ello se requiere de antenas con diagramas de radiación más dispersivos.

En Europa existen dos proyectos con esta finalidad el: HeliNet y el Capanina. El HeliNet es un proyecto administrado por un consorcio que forman un grupo de universidades europeas. Entre ellas destaca la de York (en Inglaterra) y una española (Universidad Politécnica de Cataluña).



**Figura 55: Estructura del proyecto HeliNet y el HeliPlat.**

Cómo se ha mencionado el objetivo de dichas redes es dar un soporte a grandes áreas de extensión. Un ejemplo de aplicación puede ser por ejemplo cubrir Reino Unido con una red HAP (Figura 56). Para ver los resultados de cobertura de dicho estudio se muestra la siguiente imagen:



**Figura 56: Modelo de implantación de una red mediante HAPs.**

Por último desde Reino Unido con la colaboración de otros países como Suecia se ha propuesto la misma opción con el sistema Capanina. Se han realizado una serie de experimentos con globos en ambos países (Figura 57).



**Figura 57: Pruebas de un globo estratosférico en Suecia.**

### Aplicaciones militares sobre HAP

Por último otras de las aplicaciones clave de los HAPs será su utilización como medio de transmisión para comunicaciones militares. Principalmente las plataformas se dividirán en dos tipos:

- Aeronaves tripuladas: Consisten en aviones con capacidad de otorgar las señales de comunicación. Sólo ofrecen servicios durante un limitado periodo de tiempo debido a sus requerimientos de combustible.
- Aeronaves no tripuladas: Son de pequeñas dimensiones y propulsadas por combustible fósil o energía solar. Su principal reto radica en la obtención de largos periodos de autonomía.
- Globos aerostáticos: Son de grandes dimensiones y no requieren tanta energía como las aeronaves. Su gran desventaja es que debido al gran tamaño son fácilmente detectables y pueden ser destruidas.

Los sistemas HAPs para aplicaciones militares son una opción muy viable y con unos grandes resultados debido a sus características. Algunas de dichas ventajas se exponen a continuación:

- Posibilidad de otorgar servicios de banda ancha, incluidos servicios multimedia y de tráfico de voz.
- Bajo coste y sustitución de sistemas terrestres clásicos de comunicaciones.
- Opción viable y económica frente a los servicios de comunicación por satélite y menores potencias de transmisión requeridas. En adición los retardos son menos críticos.
- Despliegue rápido y extremadamente flexible.

- Aprovechamiento de las más altas bandas de frecuencia aprovechando las características de visión directa (LOS). Esto supone una mayor disponibilidad de recursos.
- Menor probabilidad de interceptación en comparación con los sistemas terrestres y por satélite.
- Rápida y sencilla reconfiguración del sistema.

A todas estas ventajas se le une la intrínseca característica de la aplicación: el servicio militar. Es de total relevancia destacar que los mayores presupuestos de inversión en el mundo se centran en aplicaciones militares. Por ello y debido a que el principal escollo de los sistemas HAP es el alto coste que suponen de inversión, hace que la aplicación militar sea el impulso que necesite dicha tecnología para un desarrollo en otro tipo de aplicaciones.

Dentro del marco de las aplicaciones militares se han desarrollado proyectos como el HALO con el que se creó una red de datos mediante una aeronave tripulada durante un corto periodo de tiempo.

#### **4.4 Tipos de plataformas**

Por último y a modo de cerrar este apartado del proyecto se ofrecen una serie de ilustraciones (Figuras 58, 59, 60, 61) con las posibles plataformas aéreas con las que se están trabajando para los distintos proyectos mundiales:



**Figura 58: Avión tripulado M55 Geophysika.**



**Figura 59: Avión no tripulado basado en hidrógeno (Global Observer).**



**Figura 60: Plataforma no tripulado basado en energía solar (Martin Project. Escudo de defensa anti misiles USA).**



**Figura 61: Avión no tripulado basado en energía solar (NASA Pathfinder).**



## **5 CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

---

A lo largo del proyecto se ha podido comprobar la viabilidad tanto técnica como estructural del sistema. Las características más importantes y factores más determinantes han sido estudiados con el objetivo de garantizar un sistema de calidad y altas prestaciones. Como se ha podido comprobar los resultados obtenidos tanto para el apartado de televisión digital como para el de WiMAX son muy alentadores. En este sentido, con una potencia de transmisión de 20 W el servicio de televisión digital queda garantizado con una amplia protección frente a desvanecimientos por sombra e inestabilidad de la base. En relación con la difusión de WiMAX dependerá del lugar de implantación del sistema (ciudad, rural...) y de los recursos frecuenciales disponibles. Aún así con frecuencias cercanas a los 10 Watios para la banda de 2.5 GHz el servicio queda igualmente garantizado como en el caso de televisión digital. Para el resto de las bandas se deberá intentar obtener la máxima potencia de salida y configuración más compleja para garantizar la máxima tasa binaria.

Desde el punto de vista estructural y de componentes se ha realizado un trabajo de ingeniería para demostrar que todo lo mencionado en las simulaciones podía ser construido. Además se han mostrado los diferentes tipos de plataformas aéreas y los escenarios en los que el sistema puede ser implantado.

Por último en los sucesivos apéndices tanto económico como de normativa se desplegará una serie de condiciones que demuestran la viabilidad del proyecto en términos económicos y legales. De esta forma se completará el estudio de la tecnología para los distintos servicios desde un punto de vista global y abarcando diversos campos.

Con todo esto es posible afirmar pues que las comunicaciones de banda ancha y televisión digital pueden ser ofrecidas mediante un sistema formado por plataformas de gran altitud de una forma eficiente y potente. Además y con vistas a un futuro no muy lejano la posibilidad de despliegue de dicha red resultará más interesante en términos económicos, convirtiéndose en una tecnología de gran potencial para ser desplegada.



## **ANEXO A: ANÁLISIS ECÓNOMICO DEL PROYECTO**

### **Introducción**

Como se ha visto a lo largo de este proyecto la viabilidad de la tecnología WiMAX mediante HAP esta sustentada en diversos factores. Uno de los parámetros más importantes es la banda de frecuencia utilizada para la comunicación. Como se ha mostrado las posibles soluciones se basan en las bandas estandarizadas de 2,5 y 3,5 Giga Hertzios y las bandas no estandarizadas de 2,4, 5 y 28 Giga Hertzios. Resumiendo los resultados obtenidos se ha demostrado que para las frecuencias estandarizadas las potencias de transmisión bajas se obtienen resultados viables para la implantación del WiMAX independientemente de la distribución de haces. Sin embargo, para las bandas de frecuencia no estandarizadas la potencia de transmisión necesaria es mucho más elevada para obtener dicha viabilidad.

Al introducir el proyecto en un marco de negocio urge la necesidad de intentar optimizar el resultado tanto en términos técnicos como económicos. En este sentido, por ejemplo, el hecho de elegir una de las bandas de frecuencia estará condicionado por las limitaciones técnicas de potencia que se imponen y por otra parte los costes de uso de las bandas estandarizadas respecto a las que no lo están. Sin embargo, los factores que afectan al proyecto son tan numerosos que resulta una tarea muy compleja su estudio completo. A continuación, se expondrán los parámetros más importantes de una forma clara y jerarquizada para optimizar nuestro proyecto de una forma global.

### **Negocio**

La idea de desplegar WiMAX sobre un sistema HAP viene potenciado como una alternativa a las tecnologías DSL y cable con unos costes que sean viables para la obtención de resultados de una empresa. Además se intenta evitar los altos costes de despliegue de WiMAX terrenal (Figura A.1). En este sentido, los clientes potenciales del proyecto son similares a los de las tecnologías anteriormente mencionadas pero con algunos más debido al gran potencial introducido por dicha tecnología. A continuación se

expondrán algunos de los más importantes segmentos del mercado que podrían beneficiarse del proyecto:

- **Acceso Residencial y SOHO:** Hoy en día, el mercado se encuentra principalmente abastecido por el acceso a Internet mediante DSL o cable. Sin embargo, la tecnología se encuentra en los límites de su potencialidad debido a que el medio de transmisión es el par de cobre (en el caso del DSL). Además en muchos lugares remotos o rurales, el acceso a dichas tecnologías se encuentra muy limitado o con velocidades de transmisión muy bajas. Nuestro análisis mostrará la viabilidad económica de la tecnología WiMAX mediante HAPs para las distintos lugares y en función de las distintas densidades de población.
- **Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES):** Este segmento del mercado suele estar abastecido del servicio de Internet por DSL cable o fibra óptica. Sin embargo, aquellas empresas que se encuentran alejadas de los núcleos urbanos, se encuentran con numerosas limitaciones en las velocidades de acceso. En este sentido nuestro sistema proporcionará un servicio de bajo coste y altas tasas binarias de conexión.
- **Redes privadas:** Actualmente la mayoría de las redes privadas se realiza por conmutación de circuitos de la antigua red de telefonía conmutada. El servicio WiMAX sobre HAPs puede suponer una solución viable para organismos públicos o empresas privadas que desean crear su propia red privada de una forma flexible, rápida y económica.
- **Backhaul de WiFi:** Actualmente las redes de área local inalámbricas se han implantado por todo el mundo de una manera espectacular. Sin embargo, su desarrollo esta condicionado a la red metropolitana que le suministra el servicio. En este sentido la tecnología WiMAX sobre HAPs puede proporcionar el enlace de banda ancha necesario para su desarrollo.
- **Backhaul celular:** En lugar del alquiler de tecnologías T1 WiMAX puede suponer una vía de encauzar el tráfico de telefonía móvil.

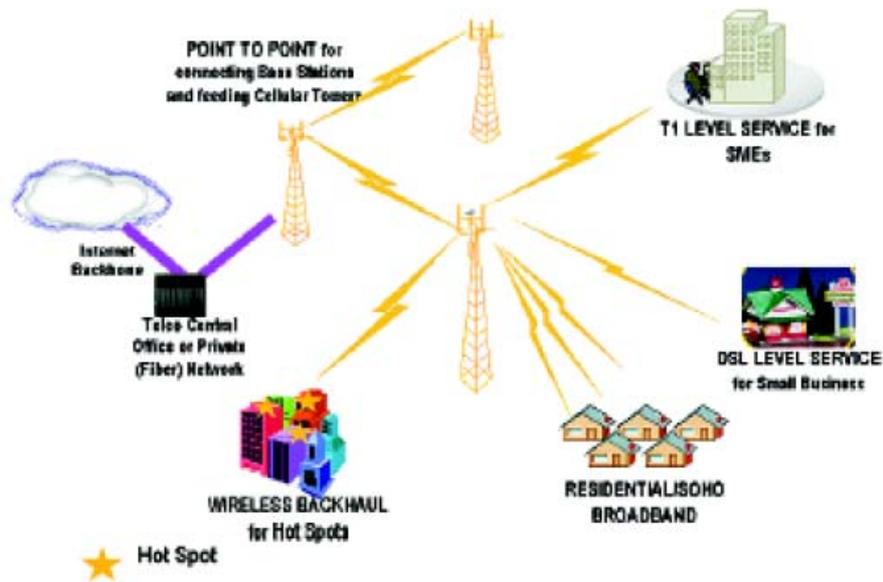


Figura A.1 Arquitectura WiMAX convencional

**Análisis demográfico**

Una vez analizado los distintos segmentos del mercado que intervienen económicamente en el proyecto, se estudiará uno de los factores determinantes de cualquier proyecto: el análisis demográfico. Dicho análisis consiste en calcular y determinar la importancia de la distribución demográfica de una zona. Dado que dicha población conformarán el conjunto de clientes potenciales del negocio es necesario realizar un análisis intensivo del mismo. En este sentido se procede a exponer los cuatro tipos de área a estudiar:

Área	Características
Urbano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran densidad de clientes potenciales.</li> <li>• Gran cantidad de edificios residenciales y oficinas.</li> <li>• Requiere de una gran cobertura territorial.</li> <li>• Alta competitividad de mercado: Diversas tecnologías de acceso.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Lenta penetración en el mercado</li> <li>○ Mayores costes de publicidad</li> </ul> </li> <li>• * Sería aconsejable bandas de frecuencia estandarizadas para disminuir la interferencia</li> </ul>
Área	Características

Suburbano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad media de clientes potenciales.</li> <li>• Se combina la cantidad de edificios residenciales y oficinas con viviendas unifamiliares.</li> <li>• Requiere una menor cobertura territorial (parques, descampados)</li> <li>• Menor competitividad de mercado: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Penetración en el mercado media</li> </ul> </li> <li>• * Se requiere de un estudio adaptado al lugar para medir interferencias con otros sistemas y elegir la banda de trabajo.</li> </ul>
Rural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja densidad de clientes potenciales (viviendas unifamiliares y pocos negocios).</li> <li>• Competitividad de mercado prácticamente nula: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Rápida penetración en el mercado y rápida recuperación de inversiones</li> </ul> </li> <li>• * Gran libertad en el uso de las bandas de frecuencia (pocos sistemas interferentes).</li> </ul>

**Tabla A.1: Características demográficas en función del área.**

### Servicios

A continuación, se van a analizar los distintos servicios otorgables por el sistema HAP. En este apéndice no se han considerado los servicios de Backhaul (tanto celular como de WiFi) por su baja rentabilidad. Esto se debe a que el mercado de WiFi no está dispuesto a pagar un precio elevado por el enlace, y el tráfico que genera suele ser alto, lo que colapsaría el sistema. Por otra parte, la telefonía celular, dispone de unas redes muy desarrolladas por lo que la aplicación de nuestro sistema para este servicio debería ser estudiado en un marco muy concreto de inicio de despliegue de telefonía en países en vías de desarrollo. Por otra parte, el desarrollo de la red privada será estudiada una vez que el sistema este asentada y siempre y cuando haya suficiente capacidad para la misma. Por estos motivos explicados no se han considerado los servicios anteriormente mencionados.

A continuación se muestran algunos de los servicios que se ofrecen mediante el sistema WiMAX sobre HAPs. Hay que tener en cuenta que el precio ofrecido no incluye tasas debido a que suelen ser aplicadas directamente al consumidor.

Cliente	Servicio	Precio /mes usuario	Otros datos
Residencial (básico)	Best effort 1Mbps	20 €	*Alquiler equipo (opcional) 10 €/mes
Residencial (premium)	Media 2Mbps y pico 4Mbps	40 €	*Alquiler equipo (opcional) 10 €/mes
PYMES (básico)	Media 2Mbps y pico 4Mbps	40 €	*Alquiler equipo (opcional) 30 €/mes
PYMES (premium)	Media 4Mbps y pico 9Mbps	80 €	*Alquiler equipo (opcional) 30 €/mes

**Tabla A.2: Servicios de Internet otorgables.**

### Adaptación del mercado

Cuando una tecnología novedosa se introduce en el mercado se produce una cierta tasa de aceptación por parte de los clientes en función de numerosos factores. Algunos de ellos son por ejemplo el número de competidores, el precio del servicio, la calidad del mismo en términos de fiabilidad, rapidez... Sin embargo y al tratarse de una tecnología nueva (tanto por WiMAX como por HAPs) se ha de tener mayor moderación en las expectativas de implantación.

Según los términos demográficos y los servicios ya mostrados se pueden realizar unas aproximaciones preliminares sobre la adaptación del proyecto en el mercado. Para ello se estudiarán los tres posibles lugares de implantación teniendo en cuenta unas expectativas más o menos optimistas.

### Entorno urbano

Cuando se implementa el sistema HAP en una gran ciudad, los posibles clientes accesibles son muy elevados. Sin embargo el producto debe de competir con numerosos competidores que gozan de la confianza de una mayor o menor medida de su producto.

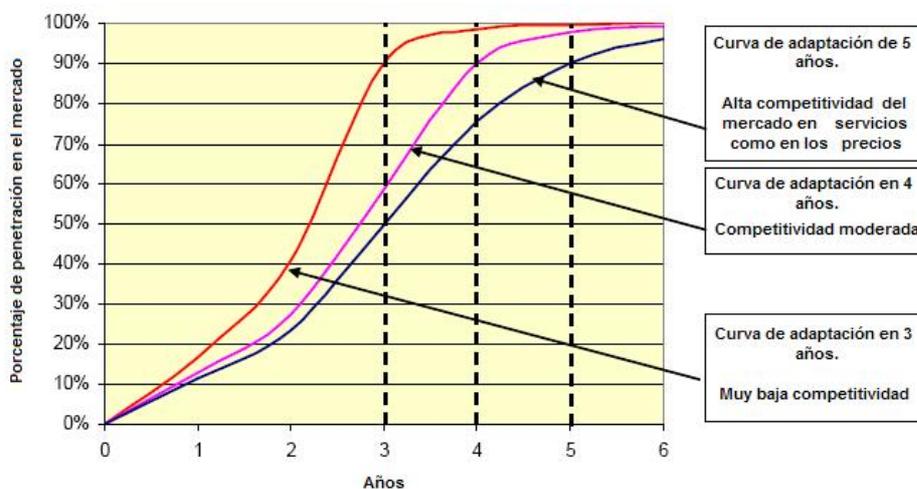
Esto junto a la falta de experiencia de nuestra tecnología suponen un recelo para los nuevos clientes. En este sentido y debido a que se requieren unos costes mayores de publicidad y gastos en publicidad, se prevé una adaptación lenta pero progresiva. En este sentido el la imagen A.2 se muestra la curva de implantación para 5 años. En este caso se muestra solamente la aceptación media del sistema para el entorno de fuerte competencia.

### Entorno suburbano

Por otra parte, la implementación del sistema en una zona del extra radio de una ciudad la cantidad de clientes potenciales disminuye. Sin embargo, la accesibilidad a otras tecnologías competidoras con nuestro servicio disminuye, provocando una mayor aceptación del mismo. Los gastos de publicidad serán menores y por lo tanto la aceptación final del producto será más rápida. En relación con lo mencionado, se representa en la misma imagen A.2 la curva de implantación para 4 años. Dicha curva esta diseñada para una competitividad moderada.

### Entorno rural

Por último para la implementación del servicio en una zona rural los clientes potenciales disminuyen drásticamente, pero en consecuencia la competitividad del mercado es prácticamente nula. Esto unido a las posibles subvenciones proporcionadas por los estados para eliminar la brecha digital entre territorios puede dar lugar a una implantación extraordinariamente rápida. En este sentido, se solapa en la Figura A.2 la curva de implantación para 2 o 3 años para una competencia prácticamente nula.



**Figura A.2: Penetración del sistema en función del entorno.**

### **Alternativas de las bandas de frecuencia**

Cómo se ha mencionado en numerosas ocasiones a lo largo del proyecto, uno de los principales escollos del sistema HAP es la elección de las bandas de frecuencia de funcionamiento. En este proyecto se ha estudiado los sistemas HAP para las frecuencias de funcionamiento de 2.5, 3.5 y 5.8 y 28 Giga Hertzios. Para mayores frecuencias los elementos que forman el sistema son poco viables o con unas prestaciones insuficientes para la viabilidad del proyecto. Dichas frecuencias estudiadas corresponden por norma general a las siguientes bandas:

- La banda estandarizada 2.5 (2.495 – 2.690) GHz conocida como banda de Servicio de Distribución Multipunto (MDS) o Servicio de Banda ancha Radio (BRS) en Estados Unidos. Se tiene un ancho de banda total de 194 MHz.
- La banda estandarizada a 3.5 (3.4 – 3.6) GHz y en algunos países también están disponibles la banda de 3.3 –3.4 y la de 3.6-3.8. En total se obtienen un ancho de banda de 200 MHz.
- La banda no estandarizada 5.8 (5.250 – 5.350 y 5.725 – 5.825) GHz llamada U-NII en Estados Unidos y disponible mundialmente. La banda inferior esta sujeta a numerosas restricciones de potencia.
- La banda no estandarizada a 28 GHz

### **Escenarios geográficos para los marcos de negocio**

Tal y como se ha expuesto en los puntos anteriores, existen tres marcos de negocio en función del lugar geográfico. A continuación, se expondrán los factores geográficos que influyen en cada uno de los mismos y que se utilizarán para el análisis económico del proyecto:

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Descripción geográfica	Ciudad grande	Ciudad	Pueblo o pequeña ciudad
Segmento de mercado	Residencial y empresas	Principalmente residencial	Residencial
Tamaño	20 Km <sup>2</sup>		15 Km <sup>2</sup>
Población	2.000.000		200.000
Densidad de población	12.000 usuarios/km <sup>2</sup> en núcleos de población 2.500 usuarios/km <sup>2</sup> en zonas de densidad media 1.200 usuarios/km <sup>2</sup> en las zonas menos densas		800 usuarios/km <sup>2</sup>
Puntos totales de acceso	400.000		40.000
Años de adaptación	5	4	3
Banda de funcionamiento	Estandarizada 2.5 y/o 3.5 GHz	Estandarizada 2.5 y/o 3.5 y/o No estandarizada 5.8 o 30 GHz	No estandarizada 5.8 o 30 GHz
Ancho de banda de canal	3.5-20 MHz , FDD		10 – 20 MHz, TDD

**Tabla A.3: Resumen de parámetros geográficos.**

## **ANÁLISIS DE COSTES**

### **Costes de la red HAP**

A lo largo de este proyecto se ha podido observar las claras ventajas que proporciona un sistema HAP respecto a una red de despliegue convencional. En el caso específico de la tecnología WiMAX, los costes de despliegue de una red terrenal respecto al sistema HAP son muy considerables. Sin embargo terrenos ajenos a la ingeniería de telecomunicación como recursos energéticos y viabilidad como plataforma aérea hacen que los datos mostrados a continuación deban ser tomados con moderación. En este sentido, a

lo largo del tiempo se consiguen mayores progresos y los costes tecnológicos disminuyen rápidamente. A continuación, se expondrán los valores aproximados de los costes que suponen la red HAP:

Descripción	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Plataforma aérea no tripulada	2 M €		
Costes de mantenimiento de la plataforma	1 M €/ año		
Enlace Backhaul	50 k €		
Equipamiento y antenas	25 k €		
Licencia de espectro	10 k €/ MHz	10 k €/ MHz	-

**Tabla A.4: Principales costes de la red HAP.**

Hay que destacar que los costes respecto a una red de WiMAX terrestre, se encuentran concentrados en la plataforma aérea no tripulada. Con este sistema de WiMAX por HAPs se consiguen importantes ahorros en aspectos como número de estaciones base, su coste de su despliegue y los enlaces entre las diferentes estaciones base. En este sentido, es fundamental que los costes de las plataformas aéreas sea el mínimo posible. Esto vendrá dado con el avance tecnológico en el terreno de la aeronáutica y el propio desarrollo del mercado por tecnologías de plataformas aéreas como HAPs.

### **Costes del equipamiento receptor**

Dentro de los terminales de recepción para el sistema WiMAX fijo, se deben de dar unas ciertas características en función de las necesidades de los clientes. En todos los casos y aunque posiblemente se pueda optar por una comunicación indoor en el caso de frecuencias de funcionamiento de 3.5 GHz, se ha considerado un Terminal externo situado en lo alto de los edificios.

El coste del dispositivo receptor y su mantenimiento será parcialmente subsanado mediante el cobro de una tasa de 12 € al mes por usuario (120 € anuales). Este precio se rebajaría un 15 % para los años sucesivos respecto al precio inicial (10 y 8 € mensuales

por usuario durante el 2º 3er año de suscripción). De esta forma se obtendría una recaudación de 360 € que corresponden al coste total pronosticado de recepción.

En esta ocasión los costes por la tecnología HAP no se diferencian frente a la de un sistema WiMAX terrestre.

## **CONCLUSIONES**

A lo largo de este apartado económico se han caracterizado los costes del despliegue de la red mediante HAPs en función de los periodos de implantación que dependen de las diferentes condiciones del entorno. En el estudio ha quedado probado que la instalación del servicio en una zona rural tendrá una adaptación mucho más rápida que en mercados con gran competencia (ciudades). Sin embargo, el potencial de una gran ciudad puede ser un objetivo más importante para una gran compañía con gran capacidad de inversión y que desee un mayor volumen de negocio. Por lo tanto el sistema HAP ofrece dos tipos de negocios (y otro intermedio a ambos) a diferentes escalas según la capacidad inversora y plazo de amortiguamiento posible.

Aún así, se debe destacar que los costes y por lo tanto el beneficio que se obtendrá de dicho sistema está condicionado a la capacidad del sector aeronáutico de lograr aeronaves autosuficientes de bajo coste y larga vida operativa.

## **ANEXO B: NORMATIVA**

---

A la hora de encarar cualquier proyecto de ingeniería que incluya una serie de servicios a clientes, es indispensable tener en cuenta la normativa existente para proporcionar un servicio de calidad. A lo largo de este proyecto se han desarrollado los servicios de difusión de televisión digital y los de acceso a redes de datos e Internet mediante WiMAX.

Para el caso de difusión digital la normativa es clara en todos los sentidos: adaptación a las bandas de transmisión y seguimiento del estándar DVB con ciertos parámetros que decide el distribuidor de la señal. Por ello y debido a la rigidez que existe sobre esta normativa, no se ha desarrollado más que la introducción mencionada en el bloque correspondiente. Para la completa instalación del servicio de difusión, solo habrá que adaptar el sistema al país de interés y seguir las normativas dictadas por el DVB ([www.dvb.org](http://www.dvb.org)).

Por otra parte, el servicio WiMAX que es una tecnología relativamente joven (estándar unificado en el 2004) tiene una cantidad de parámetros ajustables muy importantes que deben adaptarse a las normativas vigentes. En este sentido y debido a los diferentes estándares orientados a los distintos tipos de servicios se ha de analizar las características del mismo.

### **WiMAX**

Como se ha mencionado existen dos parámetros ajustables dentro de la normativa WiMAX. Por un lado el uso de la tecnología adecuada para el servicio que se quiere proporcionar en función de modulación, ancho de banda de canal, movilidad...; y por otro las bandas de frecuencia de funcionamiento que deberán adaptarse al lugar de implantación.

### Estándares 802.16

A continuación se procede a realizar una breve explicación de cada uno de los protocolos existentes dentro del marco 802.16. Acto seguido se realizará un pequeño resumen en forma de tabla de los mismos.

#### IEEE 802.16

El estándar 802.16 empezó a ser conocidos en los últimos años de los 90. En Abril de 2002 finalmente se adoptó dicho estándar para las bandas de trabajo de 10-66 GHz. Dicho estándar tenía un carácter muy genérico para explotar grandes anchos de banda de una manera eficiente. Por ello, definía una capa de control de acceso al medio capaz de soportar múltiples especificaciones de capas físicas (para abordar las distintas frecuencias de trabajo posibles).

#### IEEE 802.16a

El estándar 802.16a se aprobó en Enero del 2003 para trabajar en las bandas de trabajo de 2-11 GHz. Durante estos años se produjo una gran rivalidad para explotar el mercado del acceso inalámbrico fijo, FWA (Fixed Wireless Access). El acceso al medio se realizar mediante OFDMA y la modulación es OFDM con modulación de portadoras configurable. En Europa la técnica de acceso al medio mediante OFDMA no estaba desarrollado, por lo que fue en sucesivas mejoras del estándar cuando se ajustó mundialmente.

#### IEEE 802.16-2004 o 802.16d (revisión d)

El estándar 802.16-2004 nace para agrupar y unificar a los diferentes estándares 802.16 anteriores. Esta normativa incluyen las bandas de trabajo desde 2-66 GHz. El objetivo es poder ofrecer servicios LOS y NLOS universales. Sin embargo, el mayor esfuerzo se centro en aplicaciones de interoperabilidad en el rango de frecuencias de 2-11 GHz.

#### HiperMAN

El estándar HiperMAN es similar al 802.16-2004 pero generado por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Su principal diferencia es que el

protocolo HiperMAN está más orientado a comunicaciones de visión no directa que el protocolo de la ETSI.

### IEEE 802.16e o WiMAX móvil

Con el estándar 802.16-2004 se asentaron las bases para el acceso a la banda ancha sin hilos. Sin embargo, las expectativas futuras de WiMAX es el de obtener una red inalámbrica que unifique el mundo de la telefonía celular y las redes de datos. Con este objetivo se encaminó un grupo de trabajo que mejorase las condiciones de comunicación NLOS para las bandas de trabajo inferiores a los 6 GHz. En este sentido, se introducen mejoras en la modulación SOFDMA (Escalable OFDMA) para un uso eficiente del número de portadoras y el acceso al medio. Además se impone un soporte mejorado de antenas adaptativas (AAS) y sistemas de múltiples antenas (MIMO). Por otra parte y debido a las características móviles de los dispositivos receptores se incluyen mejoras de optimización en el consumo energético y extensas características de seguridad.

### WiBro (Wireless Broadcasting)

WiBro es el equivalente del WiMAX en Asia. Su principal objetivo reside en otorgar servicios de banda ancha a usuarios móviles. En este sentido la prioridad del mismo es la robustez del sistema frente al movimiento. Lo que se desea es dar preferencia a comunicaciones móviles muy robustas frente a la velocidad de los receptores a costa de peores prestaciones de transferencia de datos y áreas de cobertura. Utiliza un ancho de banda fijo de 8.75 MHz y acceso múltiple mediante OFDMA. Otra de sus características es la implementación del duplexado de la señal mediante TDD (Time Domain Demultiplexing)

### 802.16.f y 802.16.g

Actualmente existen grupos de trabajo que se dedican a los estándares 802.16.f y 802.16.g. Su principal objetivo es encargarse de la gestión de las interfaces de administración de la operación móvil y fija. Dichos estándares suponen unas mejoras futuras para los estándares 802.16 ya comentados.

A continuación se muestra una tabla, resumiendo los principales valores de los estándares más importantes que se han expuesto:

Estándar	IEEE 802.16	IEEE 802.16a	IEEE 802.16-2004 (802.16d)	IEEE 802.16e
Fecha de aprobación	Diciembre del 2001	Enero del 2003	Junio del 2004	Diciembre del 2005
Rango de frecuencias (GHz)	10-66	2-11	2-11	2-11 (fijo) 2-6 (móvil)
Tipo de sistema	Punto a multipunto (mallado)	Punto a multipunto (mallado)	Punto a multipunto (mallado)	Punto a multipunto (mallado)
Esquema de modulación	Portadora única	Portadora única, de 256 o 2048 OFDM	Portadora única, de 256 o 2048 OFDM	Portadora única, de 128, 256, 512, 1024, 2048 OFDM
Multiplexación	TDM/TDMA	TDM/TDMA, OFDMA	TDM/TDMA, OFDMA	TDM/TDMA, OFDMA
Modulación	QPSK, 16 ó 64-QAM	QPSK, 16 ó 64 QAM	QPSK, 16 ó 64 QAM	QPSK, 16 ó 64 QAM
Ancho de banda del canal (MHz)	20, 25 y 28	Seleccionable 1.25-20	Seleccionable 1.25-20	Seleccionable 1.25-20
Tasas binarias (Mbps)	32-134,4	1-75	1-75	1-75
Conducciones	LoS (fijo)	NLoS (fijo)	LoS y NLoS (fijo)	NLoS (móvil)

**Tabla B.1 (Tabla 5): Resumen de los principales estándares 802.16.**

**Estandarización de enclaves frecuenciales**

Una vez analizados los diferentes parámetros sobre los estándares de WiMAX, se debe de definir los diferentes parámetros que afectan al medio de comunicación o radio enlace. Actualmente todos los organismos de certificación y estandarización se están uniendo para obtener un mercado global mucho más potente. Aún así, las normas universales deben adaptarse a cada una de los países en función de los sistemas anteriores desplegados en cada uno de ellos. En este sentido, los recursos de radio frecuencia son cada vez más escasos y su obtención resulta por lo tanto más costosa y compleja. A continuación se exponen algunos de los principales posibles alojamientos de la tecnología y posteriormente se detallarán las más importantes aplicados en nuestro país.

Designation	Frequency Allocation	Amount of Spectrum	Notes
Fixed wireless access (FWA): 3.5GHz	3.4GHz – 3.6GHz mostly; 3.3GHz – 3.4GHz and 3.6GHz – 3.8GHz also available in some countries	Total 200MHz mostly; varies from $2 \times 5\text{MHz}$ to $2 \times 56\text{MHz}$ paired across nations	Not generally available in the United States. A 50MHz chunk from 3.65GHz – 3.70GHz being allocated for unlicensed operation in United States.
Broadband radio services (BRS): 2.5GHz	2.495GHz – 2.690GHz	194MHz total; 22.5MHz licenses, where a 16.5MHz is paired with 6MHz	Allocation shown is for United States after the recent change in band plan. Available in a few other countries as well.
Wireless Communications Services (WCS) 2.3GHz	2.305GHz – 2.320GHz; 2.345GHz – 2.360GHz	Two $2 \times 5\text{MHz}$ paired; two unpaired 5MHz	Allocation shown for United States. Also available in Korea, Australia, New Zealand.
License exempt: 2.4GHz	2.405GHz – 2.4835GHz	One 80MHz block	Allocation shown for United States but available worldwide. Heavily crowded band; used by Wi-Fi.
License exempt: 5GHz	5.250GHz – 5.350GHz; 5.725GHz – 5.825GHz	200MHz available in United States; additional 255MHz to be allocated	Called U-NII in United States. Generally available worldwide; lower bands have severe power restrictions.
UHF band: 700MHz	698MHz – 746MHz (lower); 747MHz – 792MHz (upper)	30MHz upper band; 48MHz lower band	Allocations shown for United States, only 18MHz of lower band auctioned so far. Other nations may follow.
Advanced wireless services (AWS)	1.710GHz – 1.755GHz; 2.110GHz – 2.155GHz	$2 \times 45\text{MHz}$ paired	Auctioned in the United States. In other parts of the world, this is used for 3G.

**Tabla B.2 (Tabla 11): Posibles alojamientos frecuenciales WiMAX.**

### Situación actual en España

Actualmente, el enfoque se realiza en las frecuencias dentro del rango que existe entre 2-6 GHz del espectro. Aquí, el ancho de banda reservado es más estrecho que el disponible en el rango de 10 a 66 GHz, al que nos referiremos como ondas milimétricas, respecto a las centimétricas del primer caso. Las ondas milimétricas se adecuan más a backhails con anchos de banda elevados y visión directa, a diferencias de las centimétricas.

El WIMAX Forum mantiene que las bandas de frecuencia deben ser colocadas de manera que los operadores con licencia puedan prestar los servicios y utilizar las tecnologías más adecuadas para su entorno. En los próximos años, el WIMAX Forum cree que se puede lograr un nivel razonable de armonización en las bandas de frecuencias que veremos a continuación

### Banda libre de 5 GHz:

El rango de frecuencias de interés incluye las bandas entre 5,25 GHz y 5,85 GHz. La banda entre 5,15 GHz y 5,25 GHz es la más utilizada para aplicaciones interiores de baja potencia, por lo que queda fuera del interés de las aplicaciones WIMAX. Esta es el caso de la banda de frecuencia usada en 802.11a (que llega hasta los 5,35GHz). Además, se caracteriza por disponer de poca potencia en las frecuencias bajas. Para el caso de las bandas inferiores a 5,47 GHz la potencia máxima es de 200 mW pIRE, mientras que para la banda de 5,47-5.725 GHz la potencia máxima es de 1 W pIRE.

En la mayoría de los países la banda de 5.47-5.725 es una banda libre, a excepción de algunos países donde hay licencias de uso, para tener constancia de las operaciones, esta banda es estratégica para permitir cubrir mercados remotos o rurales con una baja tasa de población, que pueden quedar fuera del interés de los operadores tradicionales.

En la banda superior (5725-5850 MHz) muchos países permiten una mayor potencia de salida (4 W en lugar de 1W pIRE) lo que hace que la banda sea más atractiva para aplicaciones WIMAX en larga distancia. Además de que no está tan ocupada, al estar libre de tecnologías WIFI o de la banda WRC. El WIMAX Forum promueve acciones, especialmente en Europa, para que se libere esta banda de manera armónica, que por ahora

solo se ha realizado en el Reino Unido e Irlanda. Esta banda usará TDD y canales de 10 MHz de ancho.

#### Banda con licencia de 3,5GHz

Se trata de la primera banda utilizada para operadores de banda ancha con licencia, que generalmente se localiza entre los 3,4 y 3,6 GHz, aunque hay nuevas posibilidades en el rango 3,3 y 3,4 GHz (en la actualidad en China, en fase de consultas, y la India, donde ya se ha liberado parte del espectro) y en el 3,6-3,8 GHz (donde Francia ha sido la primera, seguida por el Reino Unido, el resto de Europa y Estados Unidos, donde está en fase de consultas). Bandas superiores a ésta, puede que sean ocupadas por el Reino Unido, hasta los 4,2 GHz.

Las bandas entre 3,4 y 3,6 GHz han sido reservadas por la mayoría de los países para servicios fijos, móviles y/o por satélite, con la excepción de los Estados Unidos. En estas bandas el enfoque del foro WIMAX será el de minimizar los requisitos técnicos y reglamentarios no necesarios que puedan inhibir el desarrollo de WIMAX para esta clase de operadores. En ellas se opera tanto con TDD como con FDD, existiendo por lo general canales de 3,5 y 7 MHz.

Las características de la banda la orientan hacia aplicaciones fijas, quedando fuera del objetivo para aplicaciones móviles del 802.16e.

#### Banda mixta de 2,5GHz.

Las bandas entre 2,5 y 2,69 GHz (Multichannel Multipoint Distribution Service) han sido reservadas por Estados Unidos, México, Brasil y algunos países de Asia (principalmente Singapur) donde ha sido poco utilizadas para su utilidad original, relacionada con la transmisión de televisión. El WIMAX Forum realiza esfuerzos globales con el objetivo de aumentar la disponibilidad de estas bandas para aplicaciones de banda ancha tanto fija como móvil, estando el horizonte fijado para conseguir su disponibilidad en el 2008. Esta banda usa tanto FDD como TDD, con ancho de banda de los canales de 5 MHz, con 6 MHz en el caso de los Estados Unidos (que cuenta con 31 canales).

También en Asia, Australia y Nueva Zelanda, se utiliza la banda de 2,3 GHz, que se espera que se cubra con los sistemas de 2,5 GHz. Esta banda de 2,3 (llamada WCS) está formada por dos slots de 15 MHz, (2305-2320 MHz y 2345-2360 MHz), con una separación en medio de 25 MHz, debido a que está reservado para servicios de radio digital (DARS).

Se considera que esta banda intermedia puede suponer una fuente de interferencias.

Esta banda del espectro está orientada al desempeño de servicios móviles, dentro del estándar 802.16e, ya que es la que presenta un mejor comportamiento para este tipo de servicios.

#### Otras bandas de frecuencia:

No todo el espectro de radiofrecuencia es igual, las señales se propagan más lejos cuanto menor sea la banda de frecuencia utilizada, creando una relación directa entre el número de estaciones base utilizadas para cubrir un área de servicio dada. De manera más específica, a menor frecuencia, menor número de estaciones base. Ya que el coste de las instalaciones es determinante a la hora de acelerar el despliegue de operadores, el acceso a bandas de frecuencias menores es fundamental.

Hay ejemplos de países en vías de desarrollo en los que el uso de bandas de frecuencia menores es fundamental para permitir un despliegue. El WIMAX Forum trabaja con organismos reguladores para la reserva de espectro, tanto con licencia como libre, en bandas por debajo del 1 GHz, especialmente en bandas que queden libres en migraciones a televisión digital. Por ejemplo, en el caso de Estados Unidos, se cree que van a quedar bandas libres en el rango de los 700 MHz.

#### Uso libre o con licencia:

Los beneficios de las soluciones basadas en WIMAX, tanto en espectro con licencia como de uso libre, sobre las soluciones cableadas, son la eficiencia en costes, escalabilidad

y flexibilidad. En este apartado nos centraremos en ver cuáles son las diferencias dentro de WIMAX, entre la utilización de espectro libre o bandas licenciadas. En general, veremos que en las bandas de licencia se obtiene una mayor calidad de servicio con un mayor coste de entrada (por la compra del espectro), mientras que las bandas libres de licencia presentan una menor calidad, pero tiene un menor coste y una mayor interoperatividad.

#### Bandas con licencia:

Para emplear una solución con licencia es preciso que el operador adquiera espectro, que es un proceso muy variable en función del país en el que se quiera operar, teniendo que pasar por subastas, elevados precios y retardos considerables. Por el contrario, esta barrera de entrada, acompañada del uso exclusivo de una banda, permite conseguir una gran calidad y una interferencia muy baja.

Las frecuencias bajas asociadas a bandas licenciadas (2,5 GHz y 3,5 GHz) permiten conseguir una mejor característica NLOS. Según se incremente el despliegue de los operadores aparecerán las primeras interferencias dentro de las propias redes, que se deberán reducir con un diseño apropiado de la red.

#### Bandas de uso libre:

El elevado coste de la adquisición de espectro lleva a muchos operadores inalámbricos a considerar el uso de bandas sin licencia para áreas rurales o mercados emergentes. Este tipo de soluciones tiene una serie de ventajas respecto a las soluciones de bandas con licencia, como es el menor coste, la mayor escalabilidad o la mayor interoperatividad.

Los proveedores de servicio en mercados emergentes, como países en desarrollo o países maduros con áreas subdesarrolladas, pueden reducir el tiempo de llevar al mercado el servicio y los costes iniciales si optan por usar soluciones basadas en licencia abiertas. Además, también es posible usar estas soluciones en el caso de operadores con licencia, como backup (recursos adicionales para ofrecer seguridad en caso de emergencia) de su red habitual.

Las soluciones en bandas de libre uso están limitadas en términos de la potencia de salida transmitida, a pesar de que no sea precisa licencia. Esta potencia es el único condicionante para los proveedores, que pueden usar el espectro tanto como deseen. Otra limitación es la calidad de servicio, que vendrá dada también por el número de señales interferentes de otros operadores.

## **ANEXO C: CÓDIGO MATLAB**

### **DVB**

#### **Cálculo de SNR**

```

%TITULO- Potencia recibida en funcion de la distancia al centro y potencias
%de transmision
%AUTOR.- Jesus Sesma Aparicio, PFC 2008
clc;clear all; close all;
Ptx0=34; %Potencia tx en dBm--> 2.5W
%Ptx1=37; %Potencia tx en dBm--> 5W
Ptx1=40; %Potencia tx en dBm--> 10W
Ptx2=43; % Potencia tx en dBm--> 20W
d=22000; %Distancia en metros
f=650e6; %Frecuencia de funcionamiento en Hz
B=7.7; %Ancho de banda de la señal de TV en Hz
%-----Ganancia del dipolo x-inverted-----
x=[0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50];
y=[8 7.9 7.8 7.7 7.45 6.85 6.5 6.1 5.6 5.1 4.5];
z=polyfit(x,y,3);
ang=0:50;
g=z(1)*(ang.^3)+z(2)*(ang.^2)+z(3)*ang+z(4);
% plot(ang,g);
% title('Diagrama de radiacion de la antena X-inverted');
% xlabel('Angulo');
% ylabel('Ganancia (dBi)');
% figure;
%-----
c=3e8; %Velocidad de la luz
lambda=c/f; %Longitud de onda
NF=6; %Factor de ruido del sistema en dB

%ELECCION DE RESOLUCIONES-----
% resolucion=22;%Resolucion cada 1000 m
% res1=1000;
% resolucion=220;%Resolucion cada 100 m
% res1=100;
resolucion=440;%Resolucion cada 50 m
res1=200;
%resolucion=2200;%Resolucion cada 10 m
%res1=10;
%-----

d_centro=0:resolucion;%Distancia de los receptores al centro fisico
d_rx=(d.^2+(d_centro*d/resolucion).^2).^0.5;

```

```

for i=1:length(d_rx)
    Lfs=20*log10((4*pi*d_rx)/lambda); %Perdidas de propagacion por espacio libre
end;

N=-114 + NF + 10*log10(B); %Potencia de ruido
%S=N+SNRmin; %Sensibilidad del receptor

%Margenes= 0; % Suma de margenes extra (fading...);
%Pminrx= S+ Margenes %Potencia min en rx

Lluvia=0; % Perdidas por lluvia en dB
Lvapor=0; % Perdidas por vapores en dB

M= 0; %Margen por difraccion en dB

Lotras= Lluvia+ Lvapor; %Suma de perdidas producidas por el espacio de propagacion
distintas de las de Lfs en dB
Lf=8;%Perdidas secundarias totales del transmisor y receptor en dB

PRX0=[];
for i=0:resolucion
    angulo=asin(d_centro(i+1)*(d/resolucion)/d_rx(i+1))*180/pi;

    M=1+(10*angulo/90);

    Gantrx(i+1)=z(1)*(angulo.^3)+z(2)*(angulo.^2)+z(3)*angulo+z(4);
    Ganttx(i+1)=z(1)*(angulo.^3)+z(2)*(angulo.^2)+z(3)*angulo+z(4);

    SNR_Prx0(i+1)=Ptx0+Ganttx(i+1)+Gantrx(i+1)-Lfs(i+1)-Lf-Lotras-M-N; %Potencia rx
    en dBm para un Ptx de 34 dBm (2,5 W)
    SNR_Prx1(i+1)=Ptx1+Ganttx(i+1)+Gantrx(i+1)-Lfs(i+1)-Lf-Lotras-M-N; %Potencia rx
    en dBm para un Ptx de 37 dBm (5 W)
    SNR_Prx2(i+1)=Ptx2+Ganttx(i+1)+Gantrx(i+1)-Lfs(i+1)-Lf-Lotras-M-N; %Potencia rx
    en dBm para un Ptx de 40 dBm (10 W)
end;
SNR=[];
SNR1=[];
SNR2=[];
for i=0:resolucion
    for j=0:resolucion
        a=max(i,j);
        if(i==0 && j==0)
            SNR(i+1,j+1)=SNR_Prx0(i+1);
            SNR1(i+1,j+1)=SNR_Prx1(i+1);
            SNR2(i+1,j+1)=SNR_Prx2(i+1);
        elseif(i==0)
            SNR(i+1,j+1)=SNR_Prx0(j+1);

```

```

    SNR1(i+1,j+1)=SNR_Pr1(j+1);
    SNR2(i+1,j+1)=SNR_Pr2(j+1);
elseif(j==0)
    SNR(i+1,j+1)=SNR_Pr0(i+1);
    SNR1(i+1,j+1)=SNR_Pr1(i+1);
    SNR2(i+1,j+1)=SNR_Pr2(i+1);
elseif(j~=0 && i~=0 && sqrt((i^2)+(j^2))>sqrt(a))
    if(sqrt((i^2)+(j^2))<resolucion+1)
        SNR(i+1,j+1)=SNR_Pr0(round(sqrt((i^2)+(j^2))-0.5));
        SNR1(i+1,j+1)=SNR_Pr1(round(sqrt((i^2)+(j^2))-0.5));
        SNR2(i+1,j+1)=SNR_Pr2(round(sqrt((i^2)+(j^2))-0.5));
    else
        SNR(i+1,j+1)=SNR_Pr0(resolucion+1);
        SNR1(i+1,j+1)=SNR_Pr1(resolucion+1);
        SNR2(i+1,j+1)=SNR_Pr2(resolucion+1);
    end;
end;
end;
end;

%SNR(:,1)=SNR_Pr0';
SNR_22=SNR;
SNR_21=fliplr(SNR);
SNR_21=SNR_21(:,1:(end-1));
SNR_11=flipud(SNR_21);
SNR_11=SNR_11(1:(end-1),:);
SNR_12=flipud(SNR);
SNR_12=SNR_12(1:(end-1),:);
SNR=[SNR_11 SNR_12;SNR_21 SNR_22];

%SNR1(:,1)=SNR_Pr1';
SNR1_22=SNR1;
SNR1_21=fliplr(SNR1);
SNR1_21=SNR1_21(:,1:(end-1));
SNR1_11=flipud(SNR1_21);
SNR1_11=SNR1_11(1:(end-1),:);
SNR1_12=flipud(SNR1);
SNR1_12=SNR1_12(1:(end-1),:);
SNR1=[SNR1_11 SNR1_12;SNR1_21 SNR1_22];

%SNR2(:,1)=SNR_Pr2';
SNR2_22=SNR2;
SNR2_21=fliplr(SNR2);
SNR2_21=SNR2_21(:,1:(end-1));
SNR2_11=flipud(SNR2_21);
SNR2_11=SNR2_11(1:(end-1),:);
SNR2_12=flipud(SNR2);
SNR2_12=SNR2_12(1:(end-1),:);
SNR2=[SNR2_11 SNR2_12;SNR2_21 SNR2_22];

```

```
eje_x=-d:d/resolucion:d;
eje_y=-d:d/resolucion:d;
contourf(eje_x,eje_y,SNR);
title('SNR (dB), potencia 2.5W (34 dBm)');
xlabel('Distancia(m)');
ylabel('Distancia(m)');
colorbar
figure;

contourf(eje_x,eje_y,SNR1);
title('SNR (dB), potencia 10W (40 dBm)');
xlabel('Distancia(m)');
ylabel('Distancia(m)');
colorbar
figure;

mesh(eje_x,eje_y,SNR2);
title('SNR (dB), potencia 20W (43 dBm)');
xlabel('Distancia(m)');
ylabel('Distancia(m)');
colorbar
figure;

%REPRESENTACION BASICA
plot(eje_x(length(eje_x)/2:end), SNR_Prx0,'y');
hold on;
plot(eje_x(length(eje_x)/2:end), SNR_Prx1);
plot(eje_x(length(eje_x)/2:end), SNR_Prx2,'k');
legend('Ptx=37 dBm','Ptx=40 dBm','Ptx=43 dBm');
title('SNR en funcion de la potencia de transmision');
ylabel('SNR (dBm)');
xlabel('Distancia al centro (m)');
```

**Enlace ascendente**

```

%TITULO- Estudio del uplink
%AUTOR.- Jesus Sesma Aparicio, PFC 2008
clc;clear all; close all;
Ptx0=34; %Potencia tx en dBm--> 2.5W
Ptx1=37; %Potencia tx en dBm--> 5W
Ptx2=40; %Potencia tx en dBm--> 10W
d=22000; %Distancia en metros
f=2e9; %Frecuencia de funcionamiento en Hz
B=7.7; %Ancho de banda de la señal de TV en Hz
Ganttx=16.5; %Ganancia de la antena transmisora en dB
Gantrx=13; %Ganancia de la antena receptora en dB
c=3e8; %Velocidad de la luz
lambda=c/f; %Longitud de onda
NF=6; %Factor de ruido del sistema en dB
SNRmin=19.3; %Señal a ruido minima para una Perror <...

Lfs=20*log10((4*pi*d)/lambda); %Perdidas de propagacion por espacio libre

N=-114 + NF + 10*log10(B); %Potencia de ruido
S=N+SNRmin; %Sensibilidad del receptor

Margenes= 0; % Suma de margenes extra (fading...);
Pminrx= S+ Margenes %Potencia min en rx
Llluvia=0; % Perdidas por lluvia en dB
Lvapor=0; % Perdidas por vapores en dB
Ldifraccion=0; %Perdidas por difraccion en dB

M= 6; %Margen por difraccion en dB

Lotras= Llluvia+ Lvapor + Ldifraccion; %Suma de perdidas producidas por el espacio de
propagacion distintas de las de Lfs en dB
Lf=8;%Perdidas secundarias totales del transmisor y receptor en dB

Prx0=Ptx0+Ganttx+Gantrx-Lfs-Lf-Lotras-M %Potencia rx en dBm para un Ptx de 34 dBm
(2,5 W)
Prx1=Ptx1+Ganttx+Gantrx-Lfs-Lf-Lotras-M %Potencia rx en dBm para un Ptx de 37 dBm
(5 W)
Prx2=Ptx2+Ganttx+Gantrx-Lfs-Lf-Lotras-M %Potencia rx en dBm para un Ptx de 40 dBm
(10 W)

Prx=[Prx0 Prx1 Prx2];
plot(34:3:40, Prx, '--.r');
hold on; plot(34:3:40,Pminrx*ones(1,3));
axis([32 42 -81 -71]); grid on;
legend('Potencias de recepcion','Sensibilidad');
title('Potencia recibida en funcion de la potencia de transmision (UPLINK)');
ylabel('Potencia recibida (dBm)');
xlabel('Potencia de transmision (dBm)');

```

## WiMAX

### Configuración 1+6 (bajas frecuencias 3.5 GHz)

```

%TITULO- WiMAX para 7 celulas en una corona, frecuencia 3.5 GHz
%AUTOR.- Jesus Sesma Aparicio, PFC 2008
clc;clear all;close all;
for w=1:3;

Ptx=[37 40 43];
Ptx0=Ptx(w); %Potencia de tx en dBm
d_corona1=10000; %Distancia de la 1ª corona
haz1=d_corona1;
haz2_2=abs(haz1*cos(60*pi/180)); %Haz 2 componente i
haz2_1=abs(haz1*sin(60*pi/180)); %Haz 2 componente j
altura_HAP=23000; %Distancia en metros
d_estudio=25000; %Distancia en metros
f=3.5e9; %Frecuencia de funcionamiento en Hz
B=10; %Ancho de banda de la señal WiMAX
Ganttx_max=15; %Ganancia de la antena transmisora en dB
ng=6.35; %Factor de ganancia de la antena transmisora
Gantrx=35; %Ganancia de la antena transmisora en dB
c=3e8; %Velocidad de la luz
lambda=c/f; %Longitud de onda
NF=6; %Factor de ruido del sistema en dB
incremental=0.0000000001;

%ELECCION DE RESOLUCIONES-----
resol=50;%Resolucion cada 50 m
resolucion=d_estudio/resol;
%-----
n=[0:resolucion]; m=[0:resolucion]; % Definición de los rangos de variación de las
variables
[plano]=meshgrid(n,m); % Generación de las matrices N y M
d_centro=0:resolucion;%Distancia de los receptores al centro fisico
d_rx=(altura_HAP.^2+(d_centro*resol).^2).^0.5;

for i=1:length(d_rx)
    Lfs=20*log10((4*pi*d_rx)/lambda); %Perdidas de propagacion por espacio libre
end;

margen1corona=(20*log10((4*pi*(altura_HAP^2+d_corona1^2)^0.5)/lambda))-Lfs(1);
N=-114 + NF + 10*log10(B); %Potencia de ruido

Llluvia=0; % Perdidas por lluvia en dB
Lvapor=0; % Perdidas por vapores en dB
Ldifraccion=0; %Perdidas por difraccion en dB
M= 0; %Margen por difraccion en dB

```

Lotras= Llluvia+ Lvapor + Ldifraccion; %Suma de perdidas producidas por el espacio de propagacion distintas de las de Lfs en dB

Lf=8;%Perdidas secundarias totales del transmisor y receptor en dB

PRX0=[];

for i=0:resolucion

    angulo=asin(d\_centro(i+1)\*resol/d\_rx(i+1))\*180/pi;

    angulo=angulo\*pi/180;

    Ganttx(i+1)=Ganttx\_max\*cos(angulo)^ng;

    M=1+(10\*angulo/90);

    SNR\_Pr0(i+1)=Ptx0+Ganttx(i+1)+Gantrx-Lfs(i+1)-Lf-Lotras-M-N; %Potencia rx en dBm para un Ptx de 34 dBm (2,5 W

end;

SNR=[];

haz1=haz1/resol;

haz2\_1=round(haz2\_1/resol);

haz2\_2=round(haz2\_2/resol);

plano=zeros(501,501);

for i=0:resolucion

    for j=0:resolucion

        ang=atan((i+incremental)/(j+incremental))\*180/pi;%Incremental es un valor muy pequeño para evitar advertencias

        %Para los que pertenecen al centro

        if( sqrt(i.^2+j.^2) <= haz1)

            a=max(i,j);

            if(i==0 && j==0)

                plano(i+1,j+1)=SNR\_Pr0(i+1);

            elseif(i==0)

                plano(i+1,j+1)=SNR\_Pr0(j+1);

            elseif(j==0)

                plano(i+1,j+1)=SNR\_Pr0(i+1);

            elseif(j~=0 && i~=0 && sqrt((i^2)+(j^2))>sqrt(a))

                if(sqrt((i^2)+(j^2))<resolucion+1)

                    plano(i+1,j+1)=SNR\_Pr0(round(sqrt((i^2)+(j^2))-0.5));

                else

                    plano(i+1,j+1)=SNR\_Pr0(resolucion+1);

                end;

            end;

        end;

        %Para los que pertenecen al del eje pero no centro

        if(ang<30 && sqrt(i.^2+j.^2) > haz1/2)

            u=abs(j-haz1);

            a=max(i,u);

            if(i==0 && u==0)

                if(plano(i+1,j+1)<(SNR\_Pr0(i+1)-margen1corona))

                    plano(i+1,j+1)=SNR\_Pr0(i+1)-margen1corona;

                end;

            elseif(i==0)

```

        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(u+1)-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(u+1)-margen1corona;
        end;
    elseif(u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(i+1)-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(i+1)-margen1corona;
        end;
    elseif(u~=0 && i~=0 && sqrt((i^2)+(u^2))>sqrt(a))
        if(sqrt((i^2)+(u^2))<resolucion+1 &&
plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona;
        else
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(resolucion+1)-margen1corona;
            end;
        end;
    end;
elseif(ang>30 && sqrt(i.^2+j.^2) > haz1/2)
    u=abs(j-haz2_2);
    v=abs(i-haz2_1);
    a=max(v,u);
    if(v==0 && u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(v+1)-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(v+1)-margen1corona;
        end;
    elseif(v==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(u+1)-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(u+1)-margen1corona;
        end;
    elseif(u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(v+1)-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(v+1)-margen1corona;
        end;
    elseif(u~=0 && v~=0 && sqrt((v^2)+(u^2))>sqrt(a))
        if(sqrt((v^2)+(u^2))<resolucion+1)
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(round(sqrt((v^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(round(sqrt((v^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona;
            end;
        else
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Pr0(resolucion+1)-margen1corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Pr0(resolucion+1)-margen1corona;
            end;
        end;
    end;
end;
end;
end;
end;

anguloCritico=30;
delta1=0.45;

```

```

delta2=0.11;
delta3=0.046;
SNR_30grados1=[];
SNR_30grados2=[];
SNR_30grados3=[];
mascara=(1/50).*ones(1,50);

[a,b]=size(plano);
for i=1:a
    for j=1:b
        ang=atan((i+incremental)/(j+incremental))*180/pi;%Incremental es un valor muy
pequeño para evitar advertencias
        if(j<100 && ang>anguloCritico-delta1 && ang<anguloCritico+delta1)
            SNR_30grados1=[SNR_30grados1 plano(i,j)];
        elseif(j<300 && ang>anguloCritico-delta2 && ang<anguloCritico+delta2)
            SNR_30grados2=[SNR_30grados2 plano(i,j)];
        elseif(j<600 && ang>anguloCritico-delta3 && ang<anguloCritico+delta3)
            SNR_30grados3=[SNR_30grados3 plano(i,j)];
        end;
    end;
end;

SNR_30grados=[SNR_30grados1 SNR_30grados2 SNR_30grados3];
SNR_30grados=[SNR_30grados1 SNR_30grados2 SNR_30grados3];
SNR_30grados(1:10)
SNR_30grados=imfilter(SNR_30grados,mascara);
SNR_30grados=SNR_30grados(26:length(SNR_30grados)-26);

plot(1:(resol+8):length(SNR_30grados)*(resol+8),SNR_30grados);
title(['SNR a ',num2str(anguloCritico),'º y potencia ',num2str(Ptx(w)),' dBm']);
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('SNR (dB)');
figure;

SNR_22=plano;SNR_21=flipr(plano);SNR_21=SNR_21(:,1:(end-1));
SNR_11=flipud(SNR_21);SNR_11=SNR_11(1:(end-1),:);
SNR_12=flipud(plano);SNR_12=SNR_12(1:(end-1),:);
SNR=[SNR_11 SNR_12;SNR_21 SNR_22];

eje_x=-d_estudio:d_estudio/resolucion:d_estudio;
eje_y=-d_estudio:d_estudio/resolucion:d_estudio;
contourf(eje_x,eje_y,SNR);
title(['SNR(dB) en funcion de la distancia, potencia ',num2str(Ptx(w)),' dBm']);
xlabel('Distancia(m)');
ylabel('Distancia(m)');
colorbar
if (w<length(Ptx))
    figure;
end;end;

```

**Configuración 1+6+12 (altas frecuencias 50 GHz)**

%TITULO- WiMAX para 19 celulas en dos coronas (central+6+12), frecuencia 28 GHz  
 %AUTOR.- Jesus Sesma Aparicio, PFC 2008

```
clc;clear all;close all;
for w=1:1;
```

```
Ptx=[34];
Ptx0=Ptx(w); %Potencia de tx en dBm
d_corona1=7000; %Distancia del centro a la 1ªcorona
d_corona2=23000; %Distancia del centro a la 2ªcorona
```

```
haz1=d_corona1; %Haz 1
haz11=d_corona2; %Haz 4
haz2_2=abs(haz1*cos(60*pi/180)); %Haz 2
haz2_1=abs(haz1*sin(60*pi/180)); %Haz 2
haz3_2=abs(haz11*cos(30*pi/180)); %Haz 3
haz3_1=abs(haz11*sin(30*pi/180)); %Haz 3
haz4_2=abs(haz11*cos(60*pi/180)); %Haz 5
haz4_1=abs(haz11*sin(60*pi/180)); %Haz 5
haz5_2=abs(haz11*cos(90*pi/180)); %Haz 6
haz5_1=abs(haz11*sin(90*pi/180)); %Haz 6
```

```
altura_HAP=20000; %Distancia en metros
d_estudio=25000; %Distancia en metros
f=50e9; %Frecuencia de funcionamiento en Hz
B=10; %Ancho de banda de la señal WiMAX
Ganttx_max=20; %Ganancia de la antena transmisora en dB
ng=6.35; %Factor de ganancia de la antena transmisora
Gantrx=50; %Ganancia de la antena transmisora en dB
c=3e8; %Velocidad de la luz
lambda=c/f; %Longitud de onda
NF=6; %Factor de ruido del sistema en dB
incremental=0.0000000001;
```

```
%ELECCION DE RESOLUCIONES-----
resol=50;%Resolucion cada 50 m
resolucion=d_estudio/resol;
%-----
```

```
n=[0:resolucion]; m=[0:resolucion]; % Definición de los rangos de variación de las
variables
[plano]=meshgrid(n,m); % Generación de las matrices N y M
```

```
d_centro=0:resolucion;%Distancia de los receptores al centro fisico
d_rx=(altura_HAP.^2+(d_centro*resol).^2).^0.5;
```

```
for i=1:length(d_rx)
```

```

Lfs=20*log10((4*pi*d_rx)/lambda); %Perdidas de propagacion por espacio libre
end;

margen1corona=(20*log10((4*pi*(altura_HAP^2+d_corona1^2)^0.5)/lambda))-Lfs(1);
margen1corona=margen1corona/2;
margen2corona=(20*log10((4*pi*(altura_HAP^2+d_corona2^2)^0.5)/lambda))-Lfs(1);
margen2corona=margen2corona/2;
N=-114 + NF + 10*log10(B); %Potencia de ruido

%-----LLUVIA-----
%Consideraremos una polarizacion horizontal (las que mayor perdidas tiene
%con las gotas de agua) para suponernos en el caso peor.Capa de lluvia de
%aproximadamente 3km.
hlluvia=3;
%kh=0.187;
%alfah=1.021;
%kh=0.187;%Para 28 GHz
%alfah=1.021;%Para 28 GHz
kh=0.4;%Para 50 GHz
alfah=0.9;%Para 50 GHz
RzonaH=10; %Para el 90% del tiempo
%RzonaH=18; %Para el 97% del tiempo
%RzonaH=32; %Para el 99% del tiempo
d_rx1=(altura_HAP.^2+(d_centro*resol).^2).^0.5;
cateto=altura_HAP-hlluvia;

for i=0:resolucion
    angulo1=asin(d_centro(i+1)*resol/d_rx(i+1))*180/pi;
    dsinlluvia=cateto/cos(angulo1*pi/180);
    dlluvia(i+1)=d_rx1(i+1)-dsinlluvia;
end;
gamma=kh*RzonaH.^alfah;
d0=35*exp(-0.015*RzonaH);
Lefect=dlluvia./(1+(dlluvia./d0));
Llluvia=Lefect.*gamma;

Lniebla=1;
%-----

Ldifraccion=0; %Perdidas por difraccion en dB
M= 0; %Margen por difraccion en dB
Lotras= Lniebla + Ldifraccion; %Suma de perdidas producidas por el espacio de
propagacion distintas de las de Lfs en dB
Lf=4;%Perdidas secundarias totales del transmisor y receptor en dB
PRX0=[];
for i=0:resolucion
    angulo=asin(d_centro(i+1)*resol/d_rx(i+1))*180/pi;
    angulo=angulo*pi/180;
    Ganttx(i+1)=Ganttx_max*cos(angulo)^ng;
    M=1+(10*angulo/90);

```

```

SNR_Prx0(i+1)=Ptx0+Ganttx(i+1)+Gantrx-Lfs(i+1)-Lf-Lotras-M-N-Lluvia(i+1);
%Potencia rx en dBm para un Ptx de 34 dBm (2,5 W
end;
SNR=[];

```

```

haz1=haz1/resol;
haz11=haz11/resol;

```

```

haz2_1=round(haz2_1/resol);
haz2_2=round(haz2_2/resol);

```

```

haz3_2=round(haz3_2/resol);
haz3_1=round(haz3_1/resol);

```

```

haz4_2=round(haz4_2/resol);
haz4_1=round(haz4_1/resol);

```

```

haz5_2=round(haz5_2/resol);
haz5_1=round(haz5_1/resol);
plano=zeros(501,501);

```

```

for i=0:resolucion
    for j=0:resolucion
        ang=atan((i+incremental)/(j+incremental))*180/pi;%Incremental es un valor muy
        pequeño para evitar advertencias
        %Para los que pertenecen al centro
        if( sqrt(i.^2+j.^2) <= haz1)
            a=max(i,j);
            if(i==0 && j==0)
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(i+1);
            elseif(i==0)
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(j+1);
            elseif(j==0)
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(i+1);
            elseif(j~=0 && i~=0 && sqrt((i^2)+(j^2))>sqrt(a))
                if(sqrt((i^2)+(j^2))<resolucion+1)
                    plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(round(sqrt((i^2)+(j^2))-0.5));
                else
                    plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(resolucion+1);
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
%lcorona
if(ang<30 && sqrt(i.^2+j.^2) > haz1/2 && sqrt(i.^2+j.^2) <= haz1+(haz11-haz1) )
    u=abs(j-haz1);
    a=max(i,u);
    if(i==0 && u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(i+1)-margenlcorona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(i+1)-margenlcorona;
        end;
    end;
end;

```

```

    end;
elseif(i==0)
    if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(u+1)-margen1corona))
        plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(u+1)-margen1corona;
    end;
elseif(u==0)
    if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(i+1)-margen1corona))
        plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(i+1)-margen1corona;
    end;
elseif(u~=0 && i~=0 && sqrt((i^2)+(u^2))>sqrt(a))
    if(sqrt((i^2)+(u^2))<resolucion+1 &&
plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona))
        plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona;
    else
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(resolucion+1)-margen1corona;
        end;
    end;
end;
end;

elseif(ang>30 && sqrt(i.^2+j.^2) > haz1/2 && sqrt(i.^2+j.^2) <= haz1+(haz11-haz1)
)
    u=abs(j-haz2_2);
    v=abs(i-haz2_1);
    a=max(v,u);
    if(v==0 && u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(v+1)-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(v+1)-margen1corona;
        end;
    elseif(v==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(u+1)-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(u+1)-margen1corona;
        end;
    elseif(u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(v+1)-margen1corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(v+1)-margen1corona;
        end;
    elseif(u~=0 && v~=0 && sqrt((v^2)+(u^2))>sqrt(a))
        if(sqrt((v^2)+(u^2))<resolucion+1)
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(round(sqrt((v^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(round(sqrt((v^2)+(u^2))-0.5))-margen1corona;
            end;
        else
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(resolucion+1)-margen1corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(resolucion+1)-margen1corona;
            end;
        end;
    end;
end;
end;
end;

```

```

%%2ªcorona-----
if(sqrt(i.^2+j.^2) > haz1+((haz11-haz1)/2) && ang<15)
    u=abs(j-haz11);
    a=max(i,u);
    if(i==0 && u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(i+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(i+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(i==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(u+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(u+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(i+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(i+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(u~=0 && i~=0 && sqrt((i^2)+(u^2))>sqrt(a))
        if(sqrt((i^2)+(u^2))<resolucion+1 &&
plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen2corona;
        else
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(round(sqrt((i^2)+(u^2))-0.5))-margen2corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(resolucion+1)-margen2corona;
            end;
        end;
    end;
end;

elseif(sqrt(i.^2+j.^2) > haz1+((haz11-haz1)/2) && ang>=15 && ang<=45)
    u=abs(j-haz3_2);
    v=abs(i-haz3_1);
    a=max(v,u);
    if(v==0 && u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(v+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(v+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(v==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(u+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(u+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(v+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(v+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(u~=0 && v~=0 && sqrt((v^2)+(u^2))>sqrt(a))
        if(sqrt((v^2)+(u^2))<resolucion+1
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(round(sqrt((v^2)+(u^2))-0.5))-margen2corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(round(sqrt((v^2)+(u^2))-0.5))-margen2corona;
            end;
        else
    end;
end;

```

```

        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(resolucion+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(resolucion+1)-margen2corona;
        end;
    end;
end;

elseif(sqrt(i.^2+j.^2) > haz1+((haz11-haz1)/2) && ang>45 && ang<=75)
    u=abs(j-haz4_2);
    v=abs(i-haz4_1);
    a=max(v,u);
    if(v==0 && u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(v+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(v+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(v==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(u+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(u+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(v+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(v+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(u~=0 && v~=0 && sqrt((v^2)+(u^2))>sqrt(a))
        if(sqrt((v^2)+(u^2))<resolucion+1)
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(round(sqrt((v^2)+(u^2))-0.5))-margen2corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(round(sqrt((v^2)+(u^2))-0.5))-margen2corona;
            end;
        else
            if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(resolucion+1)-margen2corona))
                plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(resolucion+1)-margen2corona;
            end;
        end;
    end;
elseif(sqrt(i.^2+j.^2) > haz1+((haz11-haz1)/2) && ang>75)
    u=abs(j-haz5_2);
    v=abs(i-haz5_1);
    a=max(v,u);
    if(v==0 && u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(v+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(v+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(v==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(u+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(u+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(u==0)
        if(plano(i+1,j+1)<(SNR_Prx0(v+1)-margen2corona))
            plano(i+1,j+1)=SNR_Prx0(v+1)-margen2corona;
        end;
    elseif(u~=0 && v~=0 && sqrt((v^2)+(u^2))>sqrt(a))

```



```
figure;

SNR_22=plano;
SNR_21=fliplr(plano);
SNR_21=SNR_21(:,1:(end-1));
SNR_11=flipud(SNR_21);
SNR_11=SNR_11(1:(end-1),:);
SNR_12=flipud(plano);
SNR_12=SNR_12(1:(end-1),:);
SNR=[SNR_11 SNR_12;SNR_21 SNR_22];

eje_x=-d_estudio:d_estudio/resolucion:d_estudio;
eje_y=-d_estudio:d_estudio/resolucion:d_estudio;
contourf(eje_x,eje_y,SNR);
title(['\bfSNR(dB), potencia ',num2str(Ptx(w)), ' dBm']);
xlabel('\bfDistancia(m)');
ylabel('\bfDistancia(m)');
colorbar
if (w<length(Ptx))
    figure;
end
end;
```



## PRESUPUESTO

### 1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 2.000 €
- Alquiler de impresora láser durante 6 meses ..... 50 €
- Material de oficina ..... 150 €
- Total de ejecución material ..... 2.200 €

### 2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material ..... 352 €

### 3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material ..... 132 €

### 4) Honorarios Proyecto

- 640 horas a 15 € / hora ..... 9600 €

### 5) Material fungible

- Gastos de impresión ..... 60 €
- Encuadernación ..... 6 €

### 6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto ..... 12.350 €

### 7) I.V.A. aplicable

- 16% Subtotal Presupuesto ..... 1.976€

### 8) Total presupuesto

- Total Presupuesto ..... 14.326€

Madrid, Julio de 2008

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Jesús Sesma Aparicio  
Ingeniero Superior de Telecomunicación



## **PLIEGO DE CONDICIONES**

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un sistema de banda ancha y televisión digital basado en plataformas aéreas de gran altitud. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

### **Condiciones generales**

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma,

por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

### **Condiciones particulares**

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.

**HOJAS TÉCNICAS****MEZCLADORES**

Model: ARL5359LC2A

[Add To Quote](#)[Add To Quote](#)[Similar Models](#)[ARL5359LC2B](#)[ARL5359LC2C](#)[Compare Similar Models](#)**Description**

Mixer

**Documents**Techsheet: [MITEQ-ARL5359LC2 \(PDF\)](#)Outline Drawing: [165604 \(PDF\)](#)**Features**

Double Balanced	✓
Image Reject	✓
Low Noise	✓
Active Device	✓

**Frequency Ranges**

RF	5300 to 5900 (MHz)
LO	5300 to 5900 (MHz)
IF	20 to 40 (MHz)

**Electrical Specifications**

Conversion Gain	30 (dB)
LO to RF Isolation	40 (dB)
LO Power Minimum	10 (dBm)
LO Power Maximum	13 (dBm)
Image Rejection	18 (dB)
Single Sideband Noise Figure	3.5 (dB)

**Typical Performance**

Conversion Gain	33 (dB)
LO to RF Isolation	50 (dB)
LO to IF Isolation	25 (dB)
LO Power	11.5 (dBm)
Input IP3	-17 (dBm)
Output IP3	16 (dBm)
Input P1dB	-27 (dBm)
Output P1dB	6 (dBm)
RF VSWR	2.5 (Ratio)
LO VSWR	2.5 (Ratio)
IF VSWR	2 (Ratio)
Single Sideband Noise Figure	3 (dB)
Voltage 1 (Nominal)	15 (V)
Current 1 (Nominal)	150 (mA)

**Temperature Ranges**

Specs Guaranteed	25 (°C)
Operating Maximum	-54 to 85 (°C)
Storage Maximum	-65 to 125 (°C)

**Package Types**

Package	Coaxial
---------	---------

**Delivery**

Delivery	90 Days
----------	---------



Model: AR2640LI8A

[Add To Quote](#)

**Description**

Mixer

**Features**

Double Balanced	✓
Image Reject	✓
Low Noise	✓
Active Device	✓

**Frequency Ranges**

RF	26000 to 40000 (MHz)
LO	26000 to 40000 (MHz)
IF	20 to 40 (MHz)

**Electrical Specifications**

Conversion Gain	25 (dB)
LO to RF Isolation	40 (dB)
LO Power Minimum	16 (dBm)
LO Power Maximum	18 (dBm)
Image Rejection	18 (dB)
Single Sideband Noise Figure	4 (dB)
Voltage 1 Minimum	9 (V)
Voltage 1 Maximum	16 (V)
Voltage 2 Minimum	-9 (V)
Voltage 2 Maximum	-16 (V)

**Typical Performance**

Conversion Gain	30 (dB)
LO to RF Isolation	50 (dB)
LO to IF Isolation	20 (dB)
LO Power	17 (dBm)
Input IP3	-17 (dBm)
Output IP3	13 (dBm)
Input P1dB	-27 (dBm)
Output P1dB	3 (dBm)
RF VSWR	2.5 (Ratio)
LO VSWR	2.5 (Ratio)
IF VSWR	1.5 (Ratio)
Single Sideband Noise Figure	3.2 (dB)
Voltage 1 (Nominal)	12 (V)
Current 1 (Nominal)	175 (mA)

**Temperature Ranges**

Specs Guaranteed	25 (°C)
Operating Maximum	-55 to 85 (°C)
Storage Maximum	-65 to 95 (°C)

**Package Types**

Package	Coaxial
---------	---------

[Add To Quote](#)

**Documents**

Techsheet: [MITEQ-AR2640LI8 \(PDF\)](#)

Outline Drawing: [163615 \(PDF\)](#)

**Similar Models**

[AR2640LI8B](#)

[AR2640LI8C](#)

[Compare Similar Models](#)

## AMPLIFICADORES



Model: JSW5-45505100-45-0P

[Add To Quote](#)[Add To Quote](#)**Description**

Amplifier

**Features**

Waveguide ✓

**Frequency Range**

Frequency Minimum 45500 (MHz)

Frequency Max 51000 (MHz)

**Electrical Specifications**

Gain Minimum 20 (dB)

Gain Flatness 2.5 (dB+/-)

Noise Figure 4.5 (dB)

Input VSWR 2.5:1 (Ratio)

Output VSWR 2.5:1 (Ratio)

Output P1dB 27 (dBm)

Voltage 1 (Nominal) 15 (V)

Current 1 (Nominal) 120 (mA)

**Typical Performance**

Output P1dB 27 (dBm)

**Temperature Ranges**

Specs Guaranteed 23 (°C)

Specs Guaranteed 23 (°C)

Operating Maximum -40 to 60 (°C)

**Physical**

Length 4.63 (Inches)

Width 2.56 (Inches)

Height 0.99 (Inches)

**Package Types**

Package Waveguide

**Delivery**

Delivery 90 Days



Model: AMF-4B-26003100-100-36P

[Add To Quote](#)

#### Description

26-31 GHz 5W Power Amplifier

#### Frequency Range

Frequency Minimum 26000 (MHz)  
Frequency Max 31000 (MHz)

#### Electrical Specifications

Gain Minimum 18 (dB)  
Gain Flatness 1.5 (dB+/-)  
Noise Figure 9 (dB)  
Input VSWR 2:1 (Ratio)  
Output VSWR 2:1 (Ratio)  
Output P1dB 35.5 (dBm)  
Voltage 1 (Nominal) 6 (V)  
Current 1 (Nominal) 7000 (mA)  
Voltage 2 (Nominal) 5 (V)  
Current 2 (Nominal) 10 (mA)  
Impedance 50 (Ohms)

#### Typical Performance

Output P1dB 35.5 (dBm)  
Output IP3 38 (dBm)

#### Temperature Ranges

Specs Guaranteed 23 (°C)  
Operating Maximum -40 to 60 (°C)

#### Package Types

Package Coaxial

#### Delivery

Delivery 90 Days

#### Available Options

- BTO Bias via output
- GW Gain Window
- V V conn(not avail on all models)
- L Input Limiter (to +27dBm)
- TC Temperature Compensation (not avail on all models)
- PM Phase Match (+/- 10 deg, max)
- AM Amplitude Match (+/-1 dB,max) (not avail on all models)
- APM Amplitude and Phase match (not avail on all models)
- GC Gain control (up to 15 dB range)
- H Hermetic (includes fine/gross leak test)
- BTI Bias via input
- GS Gain Slope
- PS Power Supply
- F Fault alarm
- K K conn (not avail on all models)
- N N conn (not avail on all models)
- T TNC conn (not avail on all models)
- LPN Low Phase Noise
- TTL On/Off Control Switch (TTL)
- HS Heat Sink



[Add To Quote](#)

#### Documents

Techsheet: [MITEQ-AMF-4B-26003100-100-36P \(PDF\)](#)  
Outline Drawing: [159648 \(PDF\)](#)



Model: AMF-4B-02000600-70-37P

[Add To Quote](#)

[Add To Quote](#)

[Similar Models](#)

[AMF-4B-02000600-70-33P](#)

[Compare Similar Models](#)

**Description**

Amplifier- High power

**Documents**

Outline Drawing: [116879-1 \(PDF\)](#)

**Frequency Range**

Frequency Minimum 2000 (MHz)  
Frequency Max 6000 (MHz)

**Electrical Specifications**

Gain Minimum 35 (dB)  
Gain Flatness 2 (dB+/-)  
Noise Figure 7 (dB)  
Input VSWR 2:1 (Ratio)  
Output VSWR 2.8:1 (Ratio)  
Output P1dB 37 (dBm)  
Voltage 1 (Nominal) 15 (V)  
Current 1 (Nominal) 4800 (mA)  
Impedance 50 (Ohms)

**Typical Performance**

Output P1dB 37 (dBm)

**Mechanical**

Connector In SMA(F)  
Connector Out SMA(F)

**Temperature Ranges**

Specs Guaranteed 23 (°C)  
Operating Maximum -40 to 60 (°C)

**Package Types**

Package Coaxial

**Delivery**

Delivery 90 Days

**Available Options**

- BTO Bias via output
- GW Gain Window
- V V conn(not avail on all models)
- L Input Limiter (to +27dBm)
- TC Temperature Compensation (not avail on all models)
- PM Phase Match (+/- 10 deg, max)
- AM Amplitude Match (+/-1 dB,max) (not avail on all models)
- APM Amplitude and Phase match (not avail on all models)
- GC Gain control (up to 15 dB range)
- H Hermetic (includes fine/gross leak test)
- BTI Bias via input
- GS Gain Slope
- PS Power Supply
- F Fault alarm
- K K conn (not avail on all models)
- N N conn (not avail on all models)
- T TNC conn (not avail on all models)
- LPN Low Phase Noise
- TTL On/Off Control Switch (TTL)
- HS Heat Sink



Model: AMF-5B-05000650-60-40P

[Add To Quote](#)

[Add To Quote](#)

**Description**

Amplifier

**Documents**

Outline Drawing: [178767 \(PDF\)](#)

**Frequency Range**

Frequency Minimum 5000 (MHz)  
Frequency Max 6500 (MHz)

**Electrical Specifications**

Gain Minimum 40 (dB)  
Gain Flatness 1.5 (dB +/-)  
Noise Figure 6 (dB)  
Input VSWR 2:1 (Ratio)  
Output VSWR 2:1 (Ratio)  
Output P1dB 40 (dBm)  
Voltage 1 (Nominal) 15 (V)  
Current 1 (Nominal) 8000 (mA)  
Impedance 50 (Ohms)

**Typical Performance**

Output P1dB 40 (dBm)

**Mechanical**

Connector In SMA(F)  
Connector Out SMA(F)

**Temperature Ranges**

Specs Guaranteed 23 (°C)  
Operating Maximum -40 to 60 (°C)

**Physical**

Length 4.63 (Inches)  
Width 2.56 (Inches)  
Height 0.99 (Inches)

**Package Types**

Package Coaxial

**Delivery**

Delivery 90 Days

**Available Options**

- BTO Bias via output
- GW Gain Window
- V V conn(not avail on all models)
- L Input Limiter (to +27dBm)
- TC Temperature Compensation (not avail on all models)
- PM Phase Match (+/- 10 deg, max)
- AM Amplitude Match (+/-1 dB,max) (not avail on all models)
- APM Amplitude and Phase match (not avail on all models)
- GC Gain control (up to 15 dB range)
- H Hermetic (includes fine/gross leak test)
- BTI Bias via input
- GS Gain Slope
- PS Power Supply
- F Fault alarm
- K K conn (not avail on all models)
- N N conn (not avail on all models)
- T TNC conn (not avail on all models)
- LPN Low Phase Noise
- TTL On/Off Control Switch (TTL)
- HS Heat Sink

## **REFERENCIAS**

- [1] T.S. Rappaport, “Wireless communications, principles and practice”. Second Edition: Prentice Hall, 2002.
- [2] D. Grace, J. Thornton, T Konefal, C Spillard, and T. C. Tozer, “Broadband Communications from High Altitude Platforms: the European HeliNet programme” IEE. Electronics Communication Engineering Journal, vol 13, pp 138-144, 2001.
- [3] J. -M. Park, B,- J, Ku, Y. -S. Kim, and D,-. Ahn, “Technology development for wireless communication system using stratospheric platform in South Korea”. Presented at Porc, IEEE Int. Symp, Personal, indoor, Mobile Radio Communications 2002.
- [4] T. C. Tozer and D. Grace, “High Altitude platforms for wireless communications” IEE. Electronics Communication Engineering Journal, vol 13, pp 127-137, 2001
- [5] J. G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, “Fundamentals of WiMAX”, Prentice-Hall, 2007
- [6] IEEE 802.16 Working Group. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. IEEE, New York, USA, Oct. 2004.
- [7] IEEE 802.16 Working Group. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. IEEE, New York, USA, Dec. 2005.
- [8] T. C. Tozer & D. Grace, “Broadband Service Delivery from High Altitude Platforms”, COMMUNICATE 2000.
- [9] Y. Zhang, D. Grace, G. P. White, “Exploiting Multiple HAP Constellations in frequency bands below 11GHz”, 2005.

- [10] Jorge Ruiz, “Temas Avanzados en Comunicación”, Universidad Autónoma de Madrid, 2007
- [11] D. Grace, N. E. Daly, T. C. Tozer, D. A. J. Pearce, A. G. Burr, “Communications Performance of High Altitude Platform Networks operating in the mm-Wave Bands”, 2000.
- [12] Bazil Taha Ahmed, “Radiación y Radiocomunicación I y II”, Universidad Autónoma de Madrid, 2007.
- [13] José María Martínez Sánchez, “Televisión Digital”, Universidad Autónoma de Madrid, 2007.
- [14] Z. Yang, D. Grace, P.D. Mitchell, “Downlink Performance of WiMAX Broadband from HAP and Terrestrial Deployments sharing a common 3.5 GHz band”, University of York.
- [15] WiMAX forum, “Business Case Models for Fixed Broadband Wireless Access based on WiMAX Technology and the 802.16 Standar”, October 2004.
- [16] T. C. Tozer & D. Grace, “HeliNet – The European Solar-Powered HAP Project”, University of York.
- [17] David Grace, Mihael Mohorcic, Joachim Horwath, Myles H. Capstick, Marco Bobbio Pallavicini, Michael Fitch, “Communications from Aerial Platform Networks delivering Broadband for All – An Overview of the CAPANINA Project”, University of York.
- [18] Konstantinos Akalestos, Tim C. Tozer, David Grace, “Emergency Communications from High Altitude Platforms”, Athens 2005.
- [19] Tim Tozer, David Grace, “Potential Convergence for Military Communications”, University of York.

- [20] Overview of IEEE 802.16  
[http://www.wimaxforum.org/certification/tech\\_overview](http://www.wimaxforum.org/certification/tech_overview)
- [21] [www.agilent.com/find/wimax-mwj](http://www.agilent.com/find/wimax-mwj)