

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

Red de Acceso de Banda Ancha mediante WiMAX en zonas
rurales y costeras

Fernando López Delegido

Julio 2009

Red de Acceso de Banda Ancha mediante WiMAX en zonas rurales y
costeras

AUTOR: Fernando López Delegido
TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiocomunicaciones y Comunicaciones Ópticas
Dpto. de Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Julio de 2009

AGRADECIMIENTOS

Para empezar quería dar las gracias a toda mi familia ya que durante estos seis años han estado constantemente a mi lado y poco a poco me han ayudado durante toda la carrera a superar los grades baches de la misma, en especial a mis padres Fernando y Rosa, a mi hermana Cristina, también a mi tío Juan Bautista que siempre me ha echado una mano en todo lo que le he pedido y ha sido de gran ayuda y en especial a Guadalupe, que lleva demasiado tiempo aguantándome y ayudándome en todo lo posible.

Por otra parte también agradecer a Bazil Taha Ahmed la oportunidad que me ha brindado, ya que él me ha guiado pasito a pasito como dice él para que este proyecto haya salido adelante y ayudándome en todos los problemas que hemos tenido durante estos meses.

No quiero olvidarme de todos mis amigos que ante cualquier duda me han ayudado aún estando de exámenes e incluso a última hora, me han animado en todo momento, y mucho, a seguir adelante, y siempre han estado cuando los he necesitado ni tampoco de todos los profesores que cada uno durante la carrera ha aportado su granito de arena.

Finalmente agradecer en especial tanto a Antonio Aguilar como a Javier Aracil las molestias y el tiempo que han empleado para evaluar este proyecto.

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto vamos a estudiar cómo, utilizando nuevas tecnologías basadas en radio podemos ofrecer servicios de banda ancha a usuarios que no se los podremos ofrecer de otro modo o al menos de forma más económica.

Vamos a estudiar para este caso la tecnología conocida como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas).

Vamos a analizar el WiMAX fijo principalmente.

Los escenarios que vamos a señalar son dos, una zona rural en la que sería muy costoso económicamente llevar cable y por otro lado una zona costera en la que damos cobertura a los barcos que están a una cierta distancia de la costa para cubrir varios servicios, además de en la época estival poder dar servicios a los nuevos turistas, ya que la red actual está calculada para la población habitual. También hemos incluido un escenario extra, una urbe con el fin de cubrir todos los aspectos posibles.

Para la realización del proyecto hemos utilizado como software Matlab, para realizar todos los cálculos de relación señal a ruido, antenas, radios de coberturas e interferencias entre celdas y Radio Mobile para apoyarnos en el cálculo de los radios de cobertura, además nos ayuda a ver la situación y extensión de las estaciones base.

Al final analizamos la viabilidad del proyecto tanto técnica como económica, para hacer una estimación lo más exacta posible de los precios finales, los que llegan al cliente.

ABSTRACT OF THE PROJECT

In this project where are going to study how, using new radio based technologies, we can provide broad band services to clients, that can't be provided any other way, at least more economically.

We are going to focus this project in a technology known as WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), analyzing the fixed type.

The scenarios where are going to work with are a rural zone where the economical costs of providing a cable solution are unviable, and a coastal zone where we give coverage to ships that lie within a certain distance, as well as services to tourists arriving in summer time, considering that the network has been designed for a low density population. Also, in a final place, a city scenario is also studied, in order to consider every single possibility.

“MatLab” has been the software solution to carry out all calculations needed for the project, as signal to noise ratios, antennas, radio coverage and interferences between cells. Also “Radio Mobile” has been used for radio coverage, as well as for the determination of the base stations.

Finally, we analyze the technical and economical viability of the project, in order to do the most exact estimations of the final prices for users.

LISTADO DE PALABRAS CLAVE

- 802.16
- Antena
- Azimut
- Banda Ancha
- BPSK
- Brecha Digital
- Capa Física
- Capa MAC
- CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias)
- CPE (Equipos del Cliente)
- Difracción
- ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones)
- FCC (Comisión Federal de Comunicaciones)
- FDD (División de Frecuencia Duplex)
- IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)
- Inalámbrico
- LOS (Visión directa)
- Modulación
- NLOS (Sin Línea de Vista)
- OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales)
- OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal)
- OSI
- Punto de Acceso
- QAM
- Red de acceso
- Red de transporte
- Roaming
- SNIR
- TDD (División de Tiempo Duplex)
- UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
- WiBro (Banda Ancha Inalámbrica)
- WiMAX
- WiMAX Forum

KEYWORD LIST

- 802.16
- Access Network
- Access Point
- Antenna
- Azimut
- BPSK
- Broadband
- CNAF
- CPE
- Diffraction
- Digital gap
- ETSI
- FCC
- FDD
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- ITU(International Telecommunication Union)
- LOS (Line Of Sight)
- MAC Layer
- Modulation
- NLOS (None Line Of Sight)
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
- OFDMA (Orthogonal Frecuency Division Multiple Access)
- OSI
- Physical Layer
- QAM
- SNIR
- Transport Network
- TDD
- UIT
- WiBro
- WiMAX
- WiMAX Forum
- Wireless

INDICE DE CONTENIDOS

Glosario	1
1 Introducción.....	3
1.1 Motivación	3
1.2 Objetivos	3
1.3 Organización de la memoria	3
2 Sistemas WiMAX.....	5
2.1 WiMAX	5
2.1.1 Teoría de WiMAX	5
2.1.2 WiMAX Forum.....	8
2.1.3 Arquitectura de WiMAX	8
2.1.4 Capa Física de WiMAX.....	10
2.1.4.1 Capa física SC:	10
2.1.4.2 Capa física SCa.....	15
2.1.4.3 Capa física OFDM.....	16
2.1.4.4 Capa física OFDMA.....	22
2.1.5 Capa MAC de WiMAX	25
2.1.6 Cobertura de redes WiMAX	28
2.1.7 BPSK.....	29
2.1.8 QPSK	30
2.1.9 16-QAM.....	31
2.1.10 64-QAM.....	32
2.1.11 OFDM:	32
2.1.12 OFDMA:	33
2.1.13 Roaming	33
2.2 Descripción de la estación base.....	34
2.2.1 Antenas	35
2.2.1.1 Los principales parámetros que describen una antena.....	35
2.2.1.2 Antenas Direccionales	38
2.2.2 ODU e IDU	40
2.2.3 Equipos Terminales	45
3 Diseño, Resultados y Simulación	49
3.1 Simulación en MatLab	49
3.1.1 Tipo A (Ciudad).....	54
3.1.1.1 Antena de 90°.....	54
3.1.1.2 Antena de 60°.....	57
3.1.1.3 Antena de 120°.....	59
3.1.1.4 Resultados.....	63
3.1.2 Tipo B (Zona Rural).....	64
3.1.2.1 Antena de 90°	64
3.1.2.2 Antena de 60°	68
3.1.2.3 Antena de 120°.....	71
3.1.2.4 Resultados.....	76
3.1.3 Tipo C (Playa).....	78
3.1.3.1 Antena de 120°.....	78
3.1.3.2 Resultados.....	80
3.1.3.3 Antena de 90°	80
3.1.3.4 Resultados.....	82
3.1.3.5 Antena de 60°.....	82

3.1.3.6 Resutados.....	84
4 Aplicaciones	85
4.1 Ciudad	85
4.1.1 Moscú.....	87
4.1.2 Madrid.....	89
4.1.3 Barcelona	92
4.1.4 Valencia	95
4.1.5 Vigo.....	99
4.1.6 Móstoles	102
4.1.7 Alcobendas.....	105
4.1.8 Santiago de Compostela.....	108
4.1.9 Segovia.....	111
4.2 Zonas Rurales.....	114
4.3 Puertos.....	115
4.4 Otros.....	118
5 Conclusiones y trabajo futuro.....	121
5.1 Conclusiones	121
5.2 Trabajo futuro.....	121
Referencias	123
Anexos	CXXV
A Manual del programador	CXXV
B Antenas	CXXXIX
Presupuesto.....	I
Pliego de Condiciones	- 1 -
Condiciones generales.....	- 1 -
Condiciones particulares	- 3 -

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: WiMAX FORUM	8
FIGURA 2-2: ARQUITECTURA.....	9
FIGURA 2-3: ARQUITECTURA.....	9
FIGURA 2-4: TRAMAS CON EXPLOTACIÓN.....	12
FIGURA 2-5: ESQUEMA DE LA SEÑAL BANDA BASE OFDM.....	17
FIGURA 2-6: DIVERSIDAD DE ESPACIO	20
FIGURA 2-7: QPSK CON CÓDIGO GRAY	30
FIGURA 2-8: CONSTELACIÓN 16-QAM.....	31
FIGURA 2-9: CONSTELACIÓN 64-QAM.....	32
FIGURA 2-10: DIAGRAMA RADIACIÓN 2D.....	35
FIGURA 2-11: DIAGRAMA RADIACIÓN 3D.....	36
FIGURA 2-12: AZIMUT	37
FIGURA 2-13: ANTENA DIRECCIONAL	38
FIGURA 2-14: FUNCIONAMIENTO DE ANTENA DIRECTIVA	39
FIGURA 2-15: ANTENA SECTORIAL	40
FIGURA 2-16: GUÍA DE ONDA RECTANGULAR	41
FIGURA 2-17: GUÍA DE ONDA CIRCULAR.....	41
FIGURA 2-18: INTERIOR RACK DE LA IDU	43
FIGURA 2-19: CAJA EXTERIOR PARA IDU	44
FIGURA 2-20: TORRE	44
FIGURA 2-21 MÁSTIL SIMPLE	45
FIGURA 2-22: ANTENA EXTERIOR DE USUARIO	46
FIGURA 2-23: IDU	46
FIGURA 2-24: CHIP WiFi-WiMAX.....	47
FIGURA 2-25: PCMCIA.....	48
FIGURA 2-26: TELÉFONO MÓVIL CON WiMAX	48
FIGURA 3-1: CIUDAD ANTENA 90° RADIO 1 KM.....	54
FIGURA 3-2: CIUDAD ANTENA 90° RADIO 2 KM.....	54
FIGURA 3-3: CIUDAD ANTENA 90° RADIO 3 KM.....	55
FIGURA 3-4: CIUDAD ANTENA 90° RADIO 4 KM.....	55
FIGURA 3-5: CIUDAD ANTENA 90° RADIO 5 KM.....	56
FIGURA 3-6: CONEXIONES 90° CIUDAD.....	56
FIGURA 3-7: CIUDAD ANTENA 60° RADIO 1 KM.....	57
FIGURA 3-8: CIUDAD ANTENA 60° RADIO 2 KM.....	57
FIGURA 3-9: CIUDAD ANTENA 60° RADIO 3 KM.....	58
FIGURA 3-10: CONEXIONES 60° CIUDAD.....	58
FIGURA 3-11: CIUDAD ANTENA 120° RADIO 1 KM.....	59
FIGURA 3-12: CIUDAD ANTENA 120° RADIO 2 KM.....	59
FIGURA 3-13: CIUDAD ANTENA 120° RADIO 3 KM.....	60
FIGURA 3-14: CIUDAD ANTENA 120° RADIO 4 KM.....	60
FIGURA 3-15: CIUDAD ANTENA 120° RADIO 5 KM.....	61

FIGURA 3-16: CIUDAD ANTENA 120° RADIO 6 KM.....	61
FIGURA 3-17: CONEXIONES 120° CIUDAD.....	62
FIGURA 3-18: ZONA RURAL ANTENA 90° RADIO 1 KM	64
FIGURA 3-19: ZONA RURAL ANTENA 90° RADIO 2 KM	64
FIGURA 3-20: ZONA RURAL ANTENA 90° RADIO 3 KM	65
FIGURA 3-21: ZONA RURAL ANTENA 90° RADIO 4 KM	65
FIGURA 3-22: ZONA RURAL ANTENA 90° RADIO 5 KM	66
FIGURA 3-23: ZONA RURAL ANTENA 90° RADIO 6 KM	66
FIGURA 3-24: ZONA RURAL ANTENA 90° RADIO 7 KM	67
FIGURA 3-25: CONEXIONES 90° ZONA RURAL.....	67
FIGURA 3-26: ZONA RURAL ANTENA 60° RADIO 1 KM	68
FIGURA 3-27: ZONA RURAL ANTENA 60° RADIO 2 KM	69
FIGURA 3-28: ZONA RURAL ANTENA 60° RADIO 3 KM	69
FIGURA 3-29: ZONA RURAL ANTENA 60° RADIO 4 KM	70
FIGURA 3-30: CONEXIONES 60° ZONA RURAL	70
FIGURA 3-31: ZONA RURAL ANTENA 120° RADIO 1 KM	71
FIGURA 3-32: ZONA RURAL ANTENA 120° RADIO 2 KM	71
FIGURA 3-33: ZONA RURAL ANTENA 120° RADIO 3 KM	72
FIGURA 3-34: ZONA RURAL ANTENA 120° RADIO 4 KM	72
FIGURA 3-35: ZONA RURAL ANTENA 120° RADIO 5 KM	73
FIGURA 3-36: ZONA RURAL ANTENA 120° RADIO 6 KM	73
FIGURA 3-37: ZONA RURAL ANTENA 120° RADIO 7 KM	74
FIGURA 3-38: ZONA RURAL ANTENA 120° RADIO 8 KM	74
FIGURA 3-39: CONEXIONES 120° ZONA RURAL.....	75
FIGURA 3-40: ANTENA DE BARCO	77
FIGURA 3-41: PUERTO ANTENA 120° RX 8 DB.....	78
FIGURA 3-42: PUERTO ANTENA 120° RX 10 DB.....	79
FIGURA 3-43: PUERTO ANTENA 120° RX 12 DB.....	79
FIGURA 3-44: PUERTO ANTENA 90° RX 8 DB.....	80
FIGURA 3-45: PUERTO ANTENA 90° RX 10 DB.....	81
FIGURA 3-46: PUERTO ANTENA 90° RX 12 DB.....	81
FIGURA 3-47: PUERTO ANTENA 60° RX 8 DB.....	82
FIGURA 3-48: PUERTO ANTENA 60° RX 10 DB.....	83
FIGURA 3-49: PUERTO ANTENA 60° RX 12 DB.....	83
FIGURA 4-1: USO DE INTERNET	85
FIGURA 4-2: MOSCÚ	87
FIGURA 4-3: ESTACIONES MOSCÚ	87
FIGURA 4-4: SATÉLITE DE MOSCÚ	89
FIGURA 4-5: MADRID	89
FIGURA 4-6: ESTACIONES DE MADRID.....	90
FIGURA 4-7: SATÉLITE DE MADRID	92
FIGURA 4-8: BARCELONA	92
FIGURA 4-9: ESTACIONES DE BARCELONA	93

FIGURA 4-10: SATÉLITE DE BARCELONA	95
FIGURA 4-11: VALENCIA	95
FIGURA 4-12: ESTACIONES DE VALENCIA	96
FIGURA 4-13: SATÉLITE DE VALENCIA	98
FIGURA 4-14: VIGO	99
FIGURA 4-15: ESTACIONES DE VIGO.....	100
FIGURA 4-16: SATÉLITE DE VIGO	102
FIGURA 4-17: ESTACIONES MÓSTOLES	103
FIGURA 4-18: SATÉLITE MÓSTOLES	105
FIGURA 4-19: ESTACIONES ALCOBENDAS	106
FIGURA 4-20: SATÉLITE ALCOBENDAS	108
FIGURA 4-21: ESTACIONES SANTIAGO DE COMPOSTELA	109
FIGURA 4-22: SATÉLITE SANTIAGO DE COMPOSTELA.....	111
FIGURA 4-23: ESTACIONES SEGOVIA	112
FIGURA 4-24: SATÉLITE SEGOVIA.....	114
FIGURA 4-25: ZONA RURAL	115
FIGURA 4-26: DIAGRAMA DE PUERTO 240°	116
FIGURA 4-27: DIAGRAMA DE PUERTO 180°	117
FIGURA 4-28: SATÉLITE PUERTO DE VALENCIA	118
FIGURA 4-29: ESTACIÓN BASE MÓVIL.....	119

INDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: EVOLUCIÓN DE WiMAX	7
TABLA 2-2 ANCHO DE BANDA	13
TABLA 2-3: MODELOS DE CANAL	13
TABLA 2-4: SENSIBILIDAD	16
TABLA 2-5: VALORES DE C	19
TABLA 2-6: SNIR	22
TABLA 2-7: FACTOR DE RUIDO	24
TABLA 2-8: MODULACIONES	25
TABLA 2-9: CONDICIONES DE COBERTURA	29
TABLA 3-1: MODULACIONES	50
TABLA 3-2: FACTOR DE MODULACIÓN	53
TABLA 3-3: RESULTADOS CIUDAD	63
TABLA 3-4: RESULTADOS ZONA RURAL	76
TABLA 3-5: RESULTADOS ZONA COSTERA CON ANTENA DE 120°	80
TABLA 3-6: RESULTADOS ZONA COSTERA CON ANTENA DE 90°	82
TABLA 3-7: RESULTADOS ZONA COSTERA CON ANTENA DE 60°	84
TABLA 4-1: MOSCÚ	88
TABLA 4-2: MADRID	91
TABLA 4-3: BARCELONA	94
TABLA 4-4: VALENCIA	97
TABLA 4-5: VIGO	101
TABLA 4-6: MÓSTOLES	104
TABLA 4-7: ALCOBENDAS	107
TABLA 4-8: SANTIAGO DE COMPOSTELA	110
TABLA 4-9: SEGOVIA	113

Glosario

- Azimut: ángulo que se mide desde el norte geográfico en sentido de las agujas del reloj.
- Backhaul: conecta a ordenadores u otros equipos de telecomunicaciones encargados de hacer circular la información. Los backhaul suelen conectar redes de datos, redes de telefonía móvil y constituyen una estructura fundamental de las redes de comunicación.
- BER, *Bit Error Ratio*: es el número de bits que se reciben de forma incorrecta, con respecto al total de bits enviados durante un intervalo especificado de tiempo. De este modo se obtiene la tasa.
- Brecha digital: expresión que hace referencia a la diferencia socioeconómica entre aquellas comunidades que tienen Internet y aquellas que no, aunque también se puede referir a todas las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (teléfonos móviles y otros dispositivos).
- dB, *Decibelio*: es la unidad relativa empleada en telecomunicaciones para expresar la relación entre dos magnitudes, acústicas o eléctricas, o entre la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia. El decibelio, cuyo símbolo es dB, es una unidad logarítmica.
- LOS, *Line of Sight*: Se dice o aplica el término para un enlace de radio que debe tener visibilidad directa entre antenas, por lo que no debe haber obstáculo entre ambas.
- Modulación: engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea, protegiéndola de posibles interferencias y ruidos.
- NLOS, *Non Line of Sight*: abreviado como NLOS, o Fuera de la Línea de Visión, es un término utilizado en comunicaciones de radiofrecuencia. Se usa para describir un trayecto parcialmente obstruido entre la ubicación del transmisor de la señal y la ubicación del receptor de la misma. Los obstáculos incluyen árboles, edificios, montañas y otras estructuras u objetos construidos por el hombre u obra de la naturaleza.

- Portadora: Una onda portadora es una forma de onda, generalmente sinusoidal, que es modulada por una señal que se quiere transmitir. Esta onda portadora es de una frecuencia mucho más alta que la de la señal moduladora, la señal que contiene la información a transmitir. Al modular una señal desplazamos su contenido espectral en frecuencia, ocupando un cierto ancho de banda alrededor de la frecuencia de la onda portadora. Esto nos permite multiplexar en frecuencia varias señales simplemente utilizando diferentes ondas portadoras y conseguir así un uso más eficiente del espectro de frecuencias.
- Radiofrecuencia: se aplica a la porción menos energética del espectro electromagnético, situada entre unos 3 Hz y unos 300 GHz. Las ondas electromagnéticas de esta región del espectro se pueden transmitir aplicando la corriente alterna originada en un generador a una antena.
- SNR, *Signal to noise*: La relación señal/ruido se define como el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. Este margen es medido en decibelios.
- SNIR: Es lo mismo que el SNR pero además tiene en cuenta la señal Interferente.

1 Introducción

1.1 Motivación

Actualmente, las zonas rurales y periféricas, debido a su escasa población y habitualmente a su complicada orografía, resultan una inversión con escaso retorno para los actuales operadores de comunicaciones, quedando, a priori, fuera de sus planes de despliegue de banda ancha. Estas zonas son, por tanto, las últimas en acceder a las Tecnologías de Información y las Comunicaciones, estableciéndose con ello una discriminación evidente entre las zonas rurales y las zonas urbanas de una misma comarca o región, lo cual a su vez supone un freno a las posibilidades de crecimiento y desarrollo económico de las mismas. Es la denominada *Brecha Digital*.

Se favorece también a las urbes ya que se puede tener conexión en cualquier lugar, mucho más rápido que con otras tecnologías.

Además conseguiremos poder llevar la banda ancha al mar, es decir, una persona podría estar en medio del mar, hasta cierta distancia de la costa, y poder navegar por Internet, consultar el correo electrónico, ver un video sin ningún tipo de problema.

1.2 Objetivos

En este proyecto vamos a diseñar una red WiMAX para tres escenarios diferentes, una gran ciudad, una ciudad más pequeña, y una zona costera, en la que no tendremos en cuenta el crecimiento de población en el periodo estival, ya que nos centraremos principalmente en el mar adentro, es decir, para barcos, aunque también daremos servicio en las costas, en menor proporción.

El principal objetivo es estudiar la viabilidad técnica y económica del proyecto, además de entender los problemas que pueden surgir a la hora del diseño de una red, no solo de la parte técnica sino de la parte económica, menos estudiada en la carrera pero no menos importante en esta profesión.

Comprender la complejidad de una red de semejante tamaño, y aprender a realizar la totalidad de los cálculos y aspectos a tener en cuenta.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta principalmente de las siguientes partes:

I. Sistemas WiMAX

- II. Resultados y Simulaciones
- III. Aplicaciones
- IV. Conclusiones

2 Sistemas WiMAX

2.1 WiMAX

2.1.1 Teoría de WiMAX

La tecnología WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) es una evolución de Wi-Fi que se distingue por conseguir mayor ancho de banda y alcance. Además WiMAX intenta que se unifiquen e integren los estándares americano IEEE 802.16 y europeo Hiper MAN (*High performance radio MAN*).

La familia de los estándares 802.16 apareció en el año 2001 y ha evolucionado durante estos 8 años, aunque llevaba en mente de muchos desde finales de la década de los 90. Inicialmente tan solo abarcaba las aplicaciones que utilizan cobertura LOS, (*Line of Sight*) se dice cuando un enlace de radio tiene visibilidad directa entre antenas, por lo que no debe haber obstáculo entre ambas, entre las bandas de 11 y 66 GHz con licencia y tasas de hasta 70 Mbps. Se enfocaba principalmente en el eficiente uso del ancho de banda y definía una capa de control de acceso al medio para soportar todas las especificaciones de las capas físicas que pudieran utilizar la banda de 11 a 66 GHz.

En el año 2003 se definió la variante 802.16a con coberturas “Near-LOS” y NLOS (Non LOS), para frecuencias entre 2 y 11 GHz (con y sin licencia) con esto conseguimos un mayor rango de espectro, y con 3 especificaciones de capa física: una con portadora única SC (Single Carrier) y 2 con múltiples portadoras (Multicarrier) y modulaciones OFDM y OFDMA. En esta etapa se destaca el interés por toda la industria de las telecomunicaciones por ver que este sistema seguía adelante.

En el año 2004 surge una variante, llamada 802.16 – 2004 aunque también se consideraba como 802.16d, con mejoras en radio frecuencia y técnicas avanzadas de antenas que permite llegar hasta 75 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz, hablando siempre de que todas las condiciones sean favorables, con unos alcances de 50 km, en LOS y de 10 km en NLOS, con unos equipos que se podrían aproximar a un modem xDSL. Estos cambios estuvieron especialmente dirigidos al desarrollo de aplicaciones de INTEROPERABILIDAD en el rango de 2 – 11 GHz.

Aquí hay que mencionar que WiMAX se basa principalmente en el estándar 802.16 de IEEE cuando estamos hablando de LOS, en el momento que hablamos de NLOS también se apoya en gran parte en la norma HiperMAN de ETSI.

Más tarde, en 2005, aparece la norma 802.16e que ofrece plena movilidad en los equipos terminales de usuario con itinerancia regional, roaming, ya que antes solo existían los enlaces punto a punto, en frecuencias inferiores a 6 GHz y brinda unas velocidades máximas de 15 Mbps con movilidad en canalizaciones de 5 MHz. En 2006 se introdujeron los primeros microcircuitos integrados, basados en este estándar para más tarde incorporarlos en ordenadores portátiles, PDA's junto con las tecnologías de WiFi y Bluetooth. En un principio se intentaba hacer ver que para el año 2007 – 2008 se integraría en teléfonos móviles de tercera generación (3G) aunque no con mucho éxito hasta el momento, al igual que en los ordenadores portátiles.

Se pretende que WiMAX sea la tecnología inalámbrica que unifique la telefonía móvil con las redes de datos. Se mejora y optimiza este soporte, la combinación de las capacidades de comunicación tanto fijas como móviles en frecuencias por debajo de los 6 GHz, se introduce una nueva modulación llamada SOFDMA, que permite un número variable de ondas portadoras. Aparte se ofrece un soporte mejorado de las tecnologías MIMO y AAS, además de incluir mejoras para el ahorro de energía, muy importante en esta apartado ya que se tratan principalmente dispositivos móviles.

La evolución del WiMAX y las bandas que se utilizan las podríamos resumir en la Tabla 2-1.

Por otra parte, existe una tecnología llamada WiBro, WiBro es una tecnología de banda ancha inalámbrica de Internet desarrollada por la industria de telecomunicaciones coreana. Adapta TDD para duplexarse, OFDMA para el acceso múltiple y 8.75MHz como ancho de banda del canal.

WiBro fue ideado para superar la limitación de la velocidad del teléfono móvil y para agregar movilidad a Internet de banda ancha. En febrero del 2002, el gobierno coreano asignó 100 MHz del espectro electromagnético en el intervalo de 2.3-2.4 GHz, y a finales del 2004 WiBro Fase 1 fue estandarizada por el TTA de Corea, y a finales del 2005 ITU reflejó a WiBro como IEEE 802.16e.

Las estaciones base WiBro ofrecen un rendimiento de aproximadamente 30 - 50 Mbps y cubren un radio de 1,5 km. Detalladamente, proporcionará la movilidad para los dispositivos móviles hasta 120 km/h, comparado al LAN inalámbrico cuya movilidad es la velocidad de una persona en movimiento y la del teléfono móvil que tiene movilidad de hasta 250 km/h.

Durante la primera prueba, el rango actual y la banda ancha eran un poco más bajos que estos números. La tecnología también ofrecerá la movilidad del

servicio. La inclusión de QoS (Quality of Service) permite que WiBro soporte el contenido del video y otros datos de manera confiable.

Tabla 2-1: Evolución de WiMAX

Estándar	Bandas	Año de creación	Descripción
IEEE 802.16	Utiliza espectro con licencia en el rango de 10 a 66 GHz	Publicado en 2002.	Necesita línea de visión directa, con una capacidad de hasta 134 Mbps en celdas de 2 a 5 millas. Soporta calidad de servicio.
IEEE 802.16a	Bandas de 2 a 11 GHz	Publicado en abril de 2003	Ampliación del estándar 802.16 hacia, y protocolo PTP y PTMP. Con sistemas NLOS y LOS. Banda ancha Fija.
IEEE 802.16c	Bandas de 10-66 GHz	Publicado en enero de 2003	Ampliación del estándar 802.16 para definir las características y especificaciones en la banda de 10-66 GHz
IEEE 802.16d		Aprobado como 802.16-2004 en junio de 2004	Revisión del 802.16 y 802.16a para añadir los perfiles aprobados por el WiMAX Forum.
IEEE 802.16e		Publicado en diciembre de 2005	Extensión del 802.16 que incluye la conexión de banda ancha nómada para elementos portátiles del estilo a notebooks, móviles... Muy importante.

WiMAX pretende ser una tecnología muy flexible que le permita un amplio abanico de posibilidades y de aplicaciones entre las que se pueden destacar las siguientes:

- a. Cobertura de “ultima milla”, lo que llamamos la red de acceso, como alternativa al cable, a la fibra óptica, o a la tecnología LMDS, ya que WiMAX ofrece más mayor versatilidad con respecto a la situación de los terminales, dimensiones de antenas y reducción de potencia, inmunidad frente a interferencias y resistencia a los efectos de multirayecto, gracias en parte a OFDM, o también como alternativa para aquellos lugares donde

cualquiera de los otros medios, por cuestiones de infraestructura no han podido llegar, esto no es nada descabellado ya que podemos conseguir velocidades mayores que una ADSL.

b. Soporte de servicios por paquetes como IP y VoIP, servicios con conmutación de circuitos como TDM entre otros. Puede decirse que con WiMAX nos acercamos a la portabilidad con Internet.

c. Soporte de transmisión para tráfico generado por las redes de acceso, tanto de servicios fijos como de móviles.

d. Infraestructura de red fija para tráfico generado por las redes de acceso en entornos de alta densidad de tráfico WiFi (“hot spots”).

e. Radioenlaces entre puntos fijos de elevada capacidad, también llamados Backhaul, usan antenas punto a punto para conectar sitios de abonados entre sí y a las estaciones base en largas distancias.

f. Servicios especiales tales como puedan ser la localización, emergencia o mensajería.

2.1.2 WiMAX Forum

WiMAX está siendo desarrollado y promovido por el grupo de la industria WiMAX Forum (<http://www.wimaxforum.org/home>). El objetivo principal de la WiMAX Forum es promover y acelerar la introducción WiMAX y de la relación calidad-precio de éste para poder ofrecer los servicios de acceso inalámbrico de banda ancha en el mercado lo antes posible.

Recibir el certificado del WiMAX Forum significa que el producto cumple el estándar, se certifica la compatibilidad e interoperabilidad con todos los productos del WiMAX Forum. El símbolo que tiene este certificado es la Figura 2-1.



Figura 2-1: WiMAX Forum

2.1.3 Arquitectura de WiMAX

Como en todas las modernas redes digitales, la arquitectura de WiMAX consta de un conjunto de entidades funcionales y de interfaces entre ellas, como se muestran en las Figuras 2-2 y 2-3.

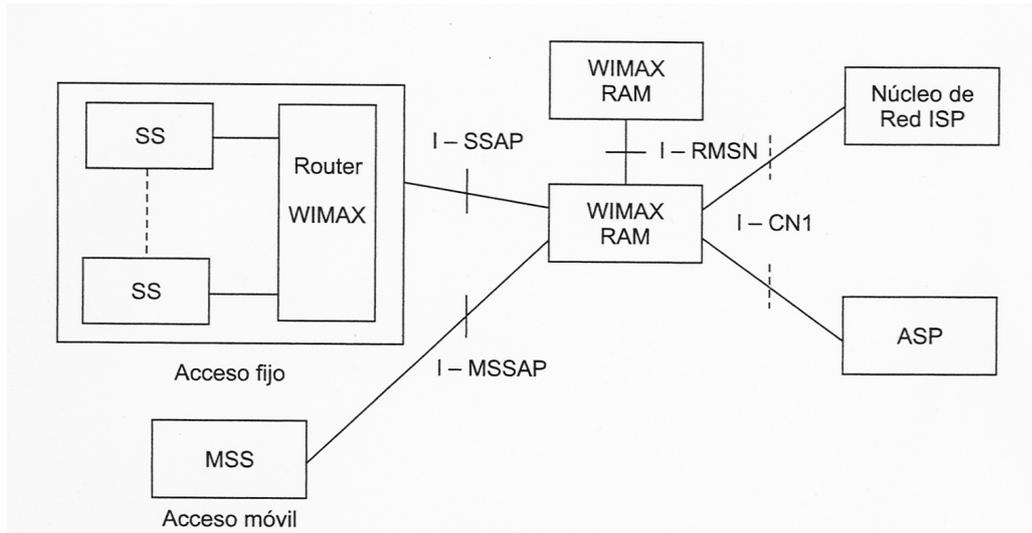


Figura 2-2: Arquitectura

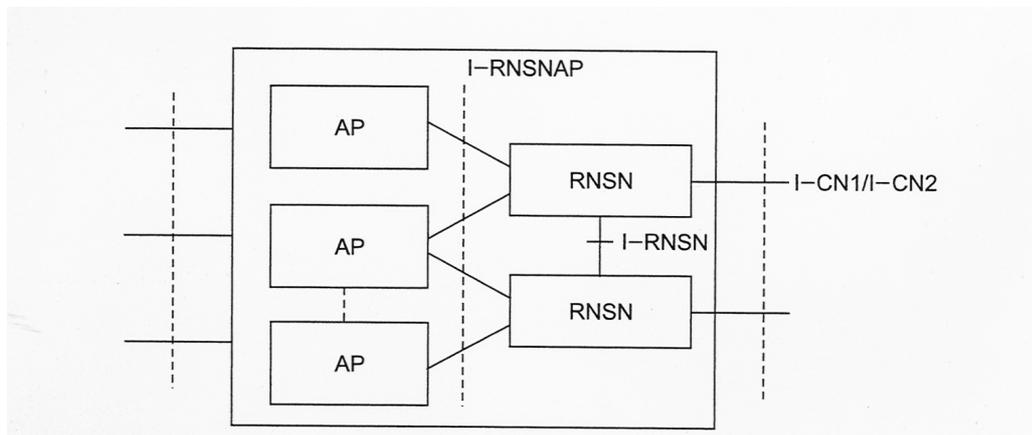


Figura 2-3: Arquitectura

Las entidades funcionales, son:

1. Nodo servidor radio RNSN (*Radio Network Serving Node*), que enlaza la red de acceso radio RAN (*Radio Access Network*) con el operador propietario del núcleo de red CN (*Core Network*) y el operador de servicios de la red IP, ISP (*Internet Services Provider*). El RNSN gestiona los recursos de la RAN y proporciona, entre otros, servicios de gestión de direcciones, autenticación de usuarios, autorización de acceso, provisionamiento de recursos, aviso de llamadas y traspaso entre redes.
2. Punto de acceso AP (*Access Point*), punto de acceso que en el estándar 802.16 se denomina estación base BS y que realiza la administración de recursos radio y el control de admisión de los usuarios. Hay múltiples configuraciones de AP en función de los requisitos de cobertura, densidad y movilidad de los usuarios.

3. Terminales de usuario fijos, SS (*Suscriber Station*) y MSS (*Mobile Suscriber Station*).

Las interfaces de interoperabilidad, son:

- I-SSAP / IMSSAP, entre terminales de usuario y puntos de acceso (interfaces “aire”) para la materialización del acceso. A través de ellos se intercambian las señales de control y los datos de usuario.
- I-CN1 / I-CN2, la primera interfaz se encarga del intercambio mensajes de datos y control de gestión con el núcleo de red CN, en tanto que la segunda es responsable de las conexiones con los servicios.
- I-RNSN, es la interfaz de comunicación entre los nodos servidores de radio. Proporciona funciones de movilidad entre las redes de radio administradas por cada nodo.
- I-RNSNAP, que permite la comunicación entre los AP de una misma red de acceso para funciones de aviso y traspaso que sustentan la movilidad de terminales conectados a AP diferentes, pertenecientes a la misma sub-red y a subredes distintas.

2.1.4 Capa Física de WiMAX

La capa física es una de las principales características de WiMAX ya que en ésta se ponen de manifiesto una gran flexibilidad de esta tecnología, es la gran variedad de entidades físicas previstas por la norma 802.16 la que permite acomodar múltiples aplicaciones, escenarios de propagación y espectro radio disponible.

Tenemos cuatro clases para clasificar las capas físicas:

1. Capa física SC.
2. Capa física SCa.
3. Capa física multiportadora OFDM.
4. Capa física multiportadora OFDMA.

2.1.4.1 Capa física SC:

Esta capa está prevista para que su correcto funcionamiento este comprendido entre la gama de frecuencias de 10 a 66 GHz. Se ha diseñado con mucha flexibilidad, para permitir a los proveedores de servicios la optimización del despliegue de redes en cuanto a planificación celular, capacidad, calidad del servicio y costes.

Aunque los requisitos del espectro dependerán de cada regulador, se considera que en la gama citada hay margen suficiente para encontrar bandas comunes que permitan la interoperabilidad de productos.

Son posibles los modos de funcionamiento en dúplex temporal TDD (*Time Division Duplex*) y de frecuencia FDD (*Frequency Division Duplex*). La transmisión se organiza mediante tramas temporales.

TDD es una técnica de duplexación usada en soluciones sin licencia y que usa el mismo canal para subir y bajar información. Sus principales ventajas son la flexibilidad ya que no requiere espectro en pares y que es asimétrica, por el contrario no puede recibir y transmitir al mismo tiempo. Se usa principalmente en ambientes con diagramas de tráfico variables la eficiencia destaca sobre el coste.

Por otro lado FDD se utiliza más cuando las frecuencias requieren licencia, aunque no siempre, y utiliza dos canales uno para subir y otro para bajar información. Sus ventajas principales son que está diseñado para un tráfico simétrico, por lo que es una tecnología muy válida para voz y no requiere tiempo de guarda, entre sus desventajas tenemos que necesitamos un par en el espectro, además de tener que pagarlo. Se utiliza en ambientes con diagramas de tráfico previsibles.

Cada trama consta de un conjunto de intervalos de tiempo TS (*Time Slots*) donde se alojan las ráfagas de datos. Éstas son adaptables, de modo que es posible el ajuste individual de parámetros de transmisión, tanto codificación como modulación, para cada usuario a nivel de trama. La capa MAC controla el número de TS asignado a una comunicación para funciones de control y tráfico de datos.

El enlace ascendente, UL, se basa en una combinación de multiacceso temporal TDMA (*Time Division Multiple Acces*) y DAMA (*Demand Division Multiple Acces*). Las transmisiones ascendentes se realizan desde cada estación de usuario SS (Subscriber Station), en forma de ráfagas de longitud variable.

El enlace descendente, DL, funciona en multiplexación temporal TDM (*Time Division Multiplex*). El flujo de bits es único y lo reciben todos los equipos de usuario SS situados en el sector celular servido por la estación base. Cada usuario extrae de ese tren de datos la información destinada al mismo.

La trama descendente contiene, en primer lugar, las informaciones comunes de sincronización y control (modo de difusión) y los datos de los usuarios.

En la Figura 2-4 se muestra un ejemplo de tramas con explotación dúplex y semidúplex.

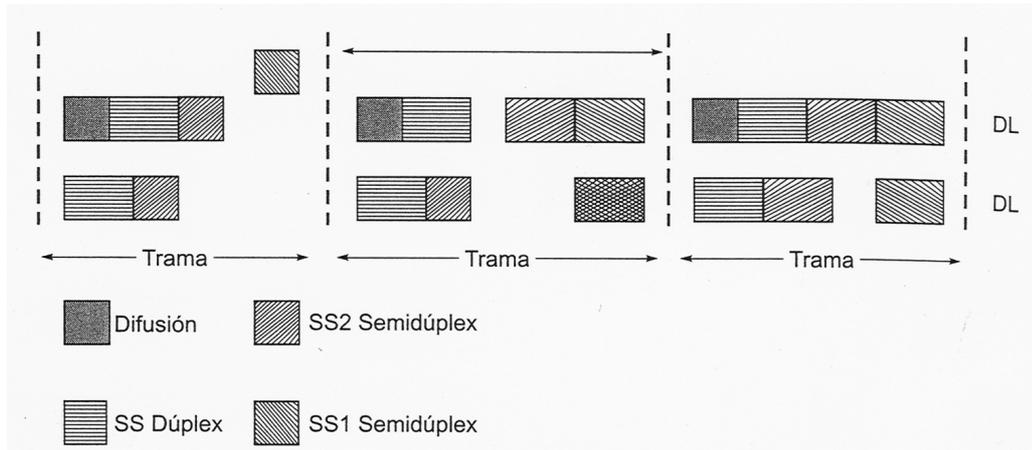


Figura 2-4: Tramas con explotación

Como se puede apreciar en la Figura 2-4, las transmisiones pueden ser continuas o discontinuas.

En el modo FDD, las tramas DL y UL se transmiten simultáneamente en frecuencias diferentes. En el modo TDD, la trama es única y se divide en dos subtramas, a del DL (que se transmite la primera) y la del UL. Las capacidades asignadas a cada enlace pueden variar dependiendo de las necesidades.

Para la trama ascendente se pueden distinguir tres tipos de ráfagas para su uso por la SS:

1. Ráfagas para acceso por contingencia, utilizadas para el establecimiento de la conexión. La SS envía estas ráfagas y espera el acuse de recibo. Si no lo recibe, por alguna colisión o pérdida, realiza una nueva tentativa.
2. Ráfagas para accesos por contienda, definidas por intervalos de petición y reservadas para respuestas a peticiones dirigidas a múltiples usuarios.
3. Ráfagas transmitidas en intervalos asignados específicamente a SS individuales.

En una trama dada pueden aparecer ráfagas de estas clases, en cualquier orden y número.

En la Tabla 2-2 se muestran los valores más típicos de la anchura de banda, tasas de símbolos y tasas de bits, duraciones de trama y número de intervalos físicos PS (*Physical Slots*)

Tabla 2-2 Ancho de banda

Ancho de Banda del Canal (MHz)	Tasa de símbolos (Mbaudios)	Tasa de bits(Mbps)		Duración de la trama (ms)	PS por trama
		QPSK	16QAM		
20	16	32	64	1	4000
25	20	40	80	1	5000
28	22,4	44,8	89,6	1	5600

Modelo de canal:

El canal radio se modela como un filtro de tres componentes, cada uno de los cuales representa un recorrido de multitrayecto. La función de transferencia es:

$$H(j\omega) = \sum_{i=1}^3 c_i \cdot \exp(-j\omega\tau_i)$$

Siendo c_i las amplitudes complejas y τ_i los retardos.

En la Tabla 2-3 se recogen los tres modelos diferentes de canal.

Tabla 2-3: Modelos de Canal

Modelo de canal	Valores de i	Amplitud de C_i	Retardo τ_i (ms)
0	1	1	0
1	1	0,995	0
	2	$0,995\exp(-j0,75)$	400/R
2	1	$0,286\exp(-j0,75)$	0
	2	0,953	400/R
	3	-0,095	800/R

Donde R es la velocidad de símbolo, medida en Mbaudios. El tipo 0 es un canal LOS, sin multitrayecto. El tipo 1 tiene una componente directa y otra de

multitrayecto, como puede ser un rayo reflejado, y el tipo 2 representa un canal de peor calidad.

En la gama de frecuencias de 11-66 GHz, el mecanismo de desvanecimiento dominante será la atenuación por lluvia, que dependerá de la región, frecuencia, polarización y distancia. De hecho, será el efecto de la lluvia el que limite la distancia de cobertura. Por ejemplo en una zona de intensidad de lluvia moderada, en torno a 25 mm/h, en la frecuencia de 28 GHz y para una disponibilidad del 99,995% el radio del celular máximo es de unos 3,5 Km.

Transmisión y recepción:

La norma 806.16 especifica características generales de los transmisores de estación base, de las que destacamos la característica principal relativa a la densidad espectral de potencia isotrópica radiada equivalente, cuyo valor es de 28,5 dBm/MHz.

Se proporciona una especificación más detallada para las características de transmisión/recepción de los equipos de usuario SS. La densidad de PIRE es 39,5 dBm/MHz. Se reconoce que estos valores pueden estar sujetos a regulación nacional. Para los SS, se estipula la sensibilidad de recepción en función de la tasa de símbolos, la tasa de errores BER y el tipo de modulación para el canal de radio de referencia que se nombro anteriormente.

Algunos ejemplos pueden ser:

- Para $BER = 10^{-3}$:
 - Con modulación QPSK $\rightarrow S \text{ (dBm)} = -94 + 10 \log R_s$
 - Con modulación 16 QAM $\rightarrow S \text{ (dBm)} = -87 + 10 \log R_s$
- Para $BER = 10^{-6}$:
 - Con modulación QPSK $\rightarrow S \text{ (dBm)} = -90 + 10 \log R_s$
 - Con modulación 16 QAM $\rightarrow S \text{ (dBm)} = -83 + 10 \log R_s$

Donde S es la sensibilidad, en dBm y R_s es la tasa de símbolos en Mbaudios. En cuanto a las condiciones de propagación, se requiere visión directa entre la estación base y el SS. Además para estas últimas se requiere el uso de antenas con gran directividad para minimizar el número de componentes tanto de multitrayecto como de interferencia.

2.1.4.2 Capa física SCa

Esta capa se ha diseñado para el funcionamiento en condiciones NLOS y bandas de frecuencia inferiores a 11 GHz. Las anchuras de banda permitidas dependen directamente de la normativa establecida para cada país en bandas sujetas a licencia. En todo caso, la anchura asignada a un usuario, será de 1,25 MHz. Entre las características de SCa, pueden destacarse:

- Posibilidad de funcionamiento en dúplex temporal TDD o de frecuencia FDD.
- Operación en TDMA en el UL y TDM o TDMA en el DL.
- Estructura de transmisión en tramas.
- Utilización de codificación de canal para control de errores mediante FEC entrelazado.
- Posibilidad de aplicación de técnicas de diversidad de transmisión y codificación espacio-tiempo, STC (*Space Time Coding*), así como sistemas de antenas avanzados, AAS (*Advanced Antenna Systems*).
- Diferentes modos de modulación: BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM.
- Mecanismos de estimación del canal radio para entornos NLOS.

Los transmisores se organizan en ráfagas insertadas en tramas TDM (enlace descendente) y TDMA (enlace ascendente), con una coordinación que es función del modo de transmisión FDD o TDD. Se han previsto tres formatos para los conjuntos de ráfagas, el formato estándar para el UL y el DL, el formato STC, que es opcional, y el formato de subcanal, también opcional y para el UL exclusivamente.

Se utilizan en la transmisión filtros en coseno alzado con factor de caída progresiva α configurable. La tasa de símbolos depende de α y de la anchura de banda del canal radio BW (MHz) según la expresión:

$$R(\text{Mbaudios}) = \frac{(BW - 0,88)}{(1 + \alpha)}$$

En la Tabla 2-4 se pueden ver los valores de la sensibilidad de recepción y de la relación señal a ruido requerida, para una BER igual a 10^{-3} , supuesto un receptor con factor de ruido de 7 dB e incluyendo un margen de realización de 3 dB.

Tabla 2-4: Sensibilidad

Modulación	Sensibilidad (dBm)	Relación S/N (dB)
QPSK	$-93,2 + 10 \log BW$	9,8
16 QAM	$-86,2 + 10 \log BW$	16,8
64 QAM	$-80 + 10 \log BW$	23,0

donde BW es la anchura de banda de canal en MHz.

2.1.4.3 Capa física OFDM

Para esta alternativa, se ha elegido la modulación OFDM por sus características especiales y robustas ante perturbaciones debidas a la propagación multitrajecto, para la explotación en condiciones NLOS en bandas de 2 a 11 GHz.

2.1.4.3.1 Multiacceso

La transmisión/recepción de los símbolos OFDM, se pueden realizar mediante los métodos de duplexión FDD y TDD. En la norma 802.16 se establece la utilización de FDD y TDD para bandas con licencia y TDD para bandas de uso común.

En FDD se asignan a cada transmisión dos portadoras para los enlaces ascendente y descendente. La separación dúplex típica entre las portadoras es de 500 o 100 MHz. FDD es idónea para tráfico simétrico en los enlaces UL-DL. La duplexión TDD es adecuada para tráfico asimétrico como suele ser el de Internet. Requiere menor potencia media que en FDD pero el protocolo de la MAC es más complejo, ya que es necesaria su sincronización para la transmisión/recepción de las ráfagas de datos.

La transmisión se estructura en tramas. Cada trama consta de dos subtramas para el UL y el DL. En FDD, ambas subtramas se transmiten simultáneamente, en tanto que en TDD la transmisión es alternativa. Las tramas se dividen en intervalos de tiempo TS en los que se alojan las ráfagas de bits.

La subtrama DL consta de un preámbulo, una cabecera de control y las ráfagas de datos. En la primera de las ráfagas se envía información sobre la estructura de la subtrama, estaciones SS destinatarias de la información, identificación de los subcanales en los que se debe transmitir cada SS en el UL, tipo de codificación y modulación. La subtrama UL consta de un periodo de acceso por

contienda para solicitud de los parámetros de transmisión/recepción y anchura de banda y a continuación los símbolos OFDM transmitidos por cada SS.

2.1.4.3.2 Transmisión OFDM

Para la transmisión OFDM se genera una señal banda base constituida por un conjunto de subportadoras, cada una de las cuales se modula digitalmente (en QPSK o M – QAM) por una secuencia de bits. Si hay N_u portadoras y la modulación es de L niveles, el número B de bits es $B = N_u \cdot \log_2 L$. La generación de esta señal banda base se realiza mediante procesado digital empleando la transformada inversa rápida de Fourier IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) con N_{FFT} subportadoras.

Esta señal se traslada luego a la frecuencia portadora RF de trabajo con un convertidor de frecuencia.

Se denomina símbolo OFDM al bloque de N_{FFT} subportadoras moduladas, que pueden ser de tres clases diferentes:

1. Subportadoras de datos, para la información de usuario.
2. Subportadoras piloto, para estimaciones de canal de radio.
3. Subportadoras “nulas”, en las que no hay transmisión, para los intervalos de guarda.

En la Figura 2-5 se muestra el esquema de la señal banda base OFDM.

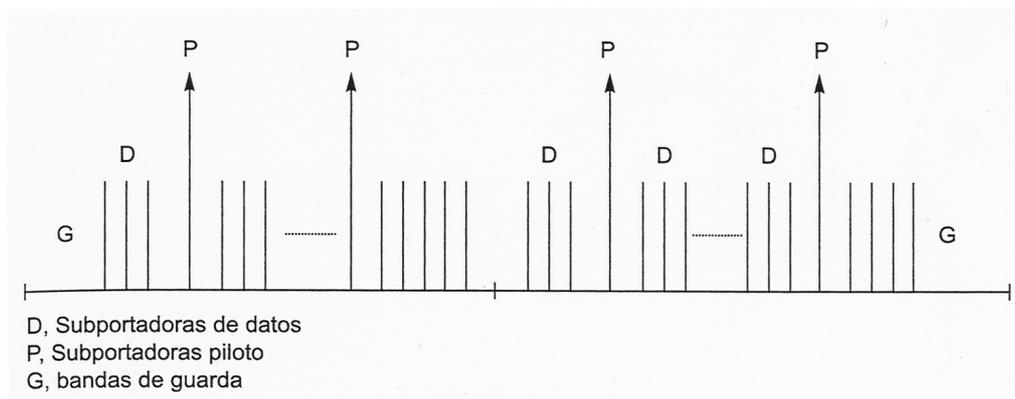


Figura 2-5: Esquema de la señal banda base OFDM

El periodo teórico del símbolo es T_s . Ahora bien, para controlar el multitrayecto se deja un tiempo sin transición (periodo de guarda, T_g) de forma que el tiempo útil del símbolo es $T_u = T_s - T_g$.

Cada símbolo de OFDM se caracteriza por cuatro parámetros:

1. BW, anchura de banda del canal RF.
2. N_u , número de subportadoras utilizadas ($N_u = 200$).
3. n , factor de muestreo
4. G , relación T_g/T_u .

El factor de muestreo viene especificado por el estándar en función de la anchura de banda RF que puede variar según la relación de cada país. Por ejemplo, para anchuras múltiplos de 1,25 MHz, $n = 144/125$

La relación G puede tomar los valores $1/4$, $1/8$, $1/16$ o $1/32$. A partir de estas magnitudes se obtienen los parámetros de anchura de banda, separación e subportadoras y duración de símbolos como sigue:

- N_{FFT} , potencia de 2, inmediatamente superior a N_u .
- Frecuencia de muestro: $F_s = \text{floor}(n \cdot BW / 800) \cdot 8000$, donde la función “floor” representa el número entero más próximo, por defecto, al argumento.
- Separación entre subportadoras: $\Delta f = \frac{F_s}{N_{FFT}}$
- Tiempo útil del símbolo: $T_u = 1/\Delta f$
- Tiempo de guarda: $T_g = G \cdot T_u$
- Duración del símbolo: $T_s = T_u + T_g$
- Periodo de muestreo: $T_u/N_{FFT} = 1/F_s$

Analizando estas ecuaciones podemos plantear un ejemplo, si tenemos una anchura de banda nominal $BW = 1,25$ MHz, con un $n = 144/125$, tenemos los siguientes resultados:

$$F_s = \text{floor} \left[\frac{144 \cdot 1,250000}{125 \cdot 8000} \right] \cdot 8000 = 180 \cdot 8000 = 1444000 \text{ Hz}$$

$F_s = 1,44$ MHz. Si $N_{FFT} = 256$, se tendrá:

$$\Delta f = \frac{1444000}{256} = 5625 \text{ Hz y el tiempo útil, será:}$$

$$T_u = \frac{10^6}{5625} = 177,8 \mu\text{s}$$

Si se toma para G, el valor 1/4, resulta:

$$T_g = 44,45 \mu\text{s} \quad \text{y} \quad T_s = 222,2 \mu\text{s}$$

De las $N_{\text{FFT}} = 256$ subportadoras, son activas $N_u = 200$. Las 56 restantes no se transmiten, sino que definen dos espacios de guarda de frecuencia, con anchuras de 28 y 27 subportadoras en los extremos inferior y superior de la banda base respectivamente.

2.1.4.3.3 *Procesado de la señal*

El procesado de la señal de datos comprende las siguientes etapas:

1. Subcanalización. En el enlace ascendente se utiliza la técnica de subcanalización, consistente en concertar la potencia de transmisión en unas pocas portadoras OFDM. Así se consigue aumentar la ganancia del sistema y mayores alcances.
2. Codificación de canal. Se utiliza un código externo RS (*Reed Solomon*) y un código interno convolucional con tasas 1/2, 3/4, o 5/6 que dependen del tipo de modulación. La codificación se combina con el entrelazado de datos.
3. Modulación. Son posibles tres tipos de modulación: QPSK, 16QAM y 64QAM. Las portadoras piloto usan siempre modulación BPSK. La modulación es adaptativa y puede cambiar en función de las características de propagación del canal radio. Si éstas empeoran, se pasa a un tipo de modulación de menos niveles.

La potencia media transmitida debe ser la misma cualquiera que sea el tipo de modulación. Por ello se emplea un factor de corrección c que multiplica a cada punto de la constelación. Los valores de c , son los señalados en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5: Valores de c

	QPSK	16QAM	64QAM
c	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{10}$	$1/\sqrt{42}$

2.1.4.3.4 Técnicas de diversidad.

Opcionalmente, se puede dar soporte para diversidad en las antenas receptoras para el enlace descendente (DL), usando técnicas como STC (*Space Time Coding*) y AAS (*Advanced Antenna System*) con la tecnología de acceso SDMA (*Spacial Division Multiple Access*).

STC Diversidad de espacio

La diversidad de espacio consiste en la habilitación de dos trayectos radioeléctricos, disponiendo de dos antenas receptoras separadas verticalmente algunas decenas de longitudes de onda, de forma que la señal emitida por un único transmisor se reciba por dos caminos distintos en dos receptores separados. Dado que los trayectos son diferentes, también variara la pérdida de propagación de uno a otro, por lo que no es muy probable el desvanecimiento simultáneo, de modo que siempre habrá una señal útil en alguna de las dos salidas.

El esquema de principio de la diversidad de espacio se presenta en la Figura 2-6.

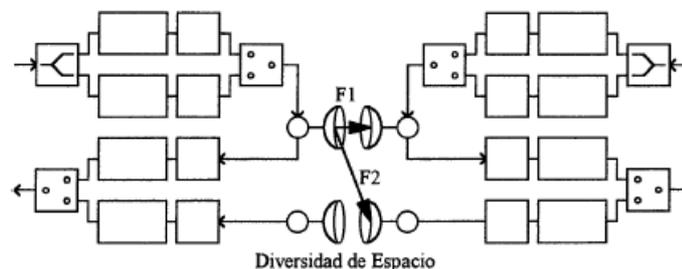


Figura 2-6: Diversidad de espacio

Una separación conveniente entre antenas viene dada por la siguiente fórmula:

$$\Delta h = \frac{\lambda \cdot d}{4h} \geq 150\lambda$$

donde d es la longitud del vano y h le altura de la antena transmisora.

La diversidad de espacio tiene la ventaja de utilizar una sola frecuencia. El equipo mínimo para un enlace completo comprende: dos antenas, un transmisor y dos receptores para cada estación. En caso de avería en el transmisor, el enlace se interrumpe. La diversidad de espacio es una de las medidas más eficiente contra el desvanecimiento multitrayecto.

SDMA

Es una tecnología que segmenta el espacio en sectores utilizando antenas unidireccionales.

Las técnicas avanzadas de antenas permiten conseguir elevada eficiencia espectral, capacidad y fiabilidad. Las antenas de tipo “beam forming” proporcionan ganancia adicional para salvar las distancias y permiten una elevada reutilización de las frecuencias, dado que disminuye la interferencia entre las células, consiste en la formación de una onda de señal reforzada mediante el desfase en distintas antenas. Sus principales ventajas son una mayor ganancia de señal además de una menor atenuación con la distancia. Gracias a la ausencia de dispersión el beam forming da lugar a un patrón bien definido pero direccional. En este tipo de transmisiones se hace necesario el uso de dominios de beam forming, sobre todo en el caso de múltiples antenas de transmisión. Hay que tener en cuenta que el beam forming requiere el conocimiento previo del canal a utilizar en el transmisor. AAS puede ser soportada en el enlace ascendente (UL) en el caso de que la estación base se encuentre habilitada para ello.

2.1.4.3.5 Control de potencia para el enlace ascendente

Se desarrollan mecanismos para controlar la potencia que transmiten las SS con cada PDU. La BS realiza mediciones de potencia de las ráfagas recibidas y tras comparar estos valores con una referencia, se envía el error con un mensaje MAC de calibración, en caso de que sea necesario, a cada CPE (*Customer Premise Equipment*). De esta forma, se reduce el consumo de potencia en el CPE, y a su vez, disminuye la interferencia cocanal en sistemas con planificación celular de coberturas y reutilización de frecuencias. Bajo las condiciones de LOS, la potencia que se transmite es proporcional a la distancia del receptor, en este caso la estación base, sin embargo para aplicaciones sin línea de vista directa, NLOS, en el control de potencia deben considerar otros factores como obstrucciones, o características del entorno.

2.1.4.3.6 Características de recepción

La sensibilidad de recepción se evalúa mediante la expresión:

$$S(dBm) = -102 + SNR_{RX} + 10 \cdot \log \left[F_S \cdot \frac{N_u}{N_{FFT}} \cdot \frac{N_{subcanales}}{16} \right]$$

Se ha establecido esta fórmula, con las siguientes hipótesis:

- Tasa de errores BER = 10^{-6} tras decodificación FEC.
- Potencia media en el conector de antena del equipo.

— Canal con ruido gaussiano AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

Los parámetros que intervienen, son:

— $SNIR_{RX}$, relación señal a ruido que depende del tipo de codificación y modulación, como se indica en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6: SNIR

Modulación	Tasa del código	SNIR (dB)
BPSK	1/2	6,4
QPSK	1/2	9,4
	3/4	11,2
16 QAM	1/2	16,4
	3/4	18,2
64 QAM	2/3	22,7
	3/4	24,4

— F_s , frecuencia de muestreo.

— $N_{\text{subcanales}}$, numero de subcanales atribuidos. Si no se emplea la subcanalización, toma el valor de 16.

2.1.4.4 Capa física OFDMA

La tecnología de capa física OFDMA es similar a la OFDM. Como ésta, se ha desarrollado para el funcionamiento en a gama de frecuencias 2-11GHz y condiciones NLOS, pero difiere en ella en que OFDMA se aplica una técnica llamada subcanalización, que consiste en lo siguiente: las subportadoras activas se dividen en subconjuntos, cada uno de los cuales constituye un subcanal. Pueden definirse subcanales tanto en el UL como en el DL. Los subcanales pueden ser utilizados por distintos usuarios. Ello proporciona al sistema un grado de escalabilidad y flexibilidad en el reparto del recurso de anchura de banda. En el enlace DL, pueden darse las siguientes situaciones:

1. Transmisión en difusión global (*broadcast*) o selectiva (*multicast*). No se requiere subcanalización, ya que se transmite la misma información a

todos los usuarios servidos por la misma estación base. Por lo tanto, se utiliza todo el ancho de banda que ofrecen los canales implicados.

2. Transmisión individual (*unicast*). Se necesita la subcanalización ya que un mismo subcanal puede estar dedicado a diferentes receptores en intervalos temporales distintos. Solo habrá que transmitir en las frecuencias asignadas al usuario concreto en el intervalo que le corresponda y no en todo el ancho de banda del canal.

3. En el enlace UL, siempre se requiere la subcanalización y asignación de intervalo de tiempo, dentro del subcanal o subcanales asignados a diferentes usuarios. Aun transmisor se le pueden atribuir uno o más subcanales en el mismo intervalo de tiempo para el acceso en paralelo por parte de distintos usuarios en esos subcanales disjuntos o para la ejecución en paralelo de aplicaciones diferentes en la misma SS.

La capa física OFDMA, que emplea los mismos esquemas de codificación y modulación que OFDM, está abierta sin embargo, a la aplicación de técnicas avanzadas de antenas. Es posible la utilización de sistemas de diversidad y de antenas adaptativas, así como de técnicas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), con combinación MRC (*Maximal Ratio Combining*) o EGC (*Equal Gain Combining*).

MIMO se refiere específicamente a la forma de como son manejadas las ondas de transmisión y recepción en antenas para dispositivos inalámbricos como pueden ser los enrutadores. En el formato de transmisión inalámbrica tradicional la señal se ve afectada por reflexiones, lo que ocasiona degradación o corrupción de la misma y por lo tanto pérdida de datos. Aprovecha fenómenos físicos como la propagación multitrayecto para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error. En pocas palabras MIMO aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica por medio de la utilización del dominio espacial. MRC es el método de combinación por razón máxima que pesa las señales recibidas por cada antena y las combina coherentemente para maximizar la SNR de la señal resultante, es una manera inteligente de combinar las señales recibidas a través de 2 (o más) antenas independientes. EGC es un método similar al MRC. De hecho usa los mismos pesos que MRC pero con amplitud unitaria. Presenta una reducción de rendimiento frente al MRC cuando una de las señales tiene una SNR baja. Dado que todas se pesan igual, la combinación de las señales degrada la relación señal a ruido comparada con el caso MRC.

Las ganancias que se pueden conseguir dependen de las características del canal radio, así como del tipo de antena y procesado posterior de las señales. Por

ejemplo, para un canal con desvanecimiento Rayleigh con dispersión de retardo de 100 ns pueden obtenerse que van desde los 8 dB con diversidad de selección hasta 10 dB con EGC y 14 dB con MRC. Sin embargo, también es cierto que la complejidad y los costes de los equipos aumentan con relación a las técnicas que ofrecen mayores ganancias.

En cuanto al control de potencia, además de los algoritmos de control de la capa física, la BS debe monitorizar la relación señal a ruido, SNR y modificar dinámicamente la modulación (número de niveles) y la anchura de banda asignada a cada enlace con las SS para cumplir el grado de calidad de tasa de errores BER que se haya establecido.

La sensibilidad de la recepción, para una $BER = 10^{-6}$ y canal AWGN depende de la anchura de banda, tasa del código convolucional y tipo de modulación. En la Tabla 2-7 se facilitan algunos valores representativos, para un factor de ruido del receptor de 7 dB,

Tabla 2-7: Factor de Ruido

<i>Ancho de banda (MHz)</i>	<i>Modulación</i>					
	<i>QPSK</i>		<i>16 QAM</i>		<i>64 QAM</i>	
	<i>Tasa cód.</i>		<i>Tasa cód.</i>		<i>Tasa cód.</i>	
	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
1,5	-91	-89	-84	-82	-78	-76
1,75	-90	-87	-83	-81	-77	-75
3,5	-87	-85	-80	-78	-74	-72
10	-83	-81	-76	-74	-69	-68

un margen de realización de 5 dB y los valores de la relación señal a ruido de la Tabla 2-8.

Tabla 2-8: Modulaciones

<i>Modulación</i>	<i>E_b/N_o(dB)</i>	<i>Tasa de codificación</i>	<i>SNR en recepción (dB)</i>
QPSK	10,5	1/2	9,4
		3/4	11,2
16 QAM	14,5	1/2	16,4
		3/4	18,2
64 QAM	19,0	2/3	22,7
		3/4	24,4

2.1.5 Capa MAC de WiMAX

Ésta capa está diseñada principalmente para accesos PMP (Punto - MultiPunto) que tienen banda ancha y una tasa de datos muy alta. También tiene una gran variedad de elementos que permitan ofrecer una calidad del servicio (QoS).

Esta capa permite que un mismo terminal lo puedan compartir varios usuarios, la flexibilidad se la dan unos algoritmos que nos permiten tener cientos de usuarios finales con distintas anchos de banda o latencia. Esta capa también es la encargada de manejar la necesidad de tener muy alta la tasa de bits tanto para el UP como para el DL. El sistema ha sido diseñado para incluir voz y datos, el protocolo de Internet (IP), y el de voz sobre éste (VoIP). Por esto WiMAX debe soportar ATM o protocolos basados en paquetes.

La capa MAC la podemos dividir en 3 subcapas:

- **Convergencia:**

Se encarga de adaptar las unidades de datos de protocolos de alto nivel al formato MAC SDU y viceversa. También se encarga de clasificar los SDUs de la MAC entrantes a las conexiones a las que pertenecen.

- **Parte común:**

Esta es la subcapa donde se maneja el ancho de banda, se establece la conexión y los protocolos de unidad de datos. También se encarga de hacer

el intercambio de la unidad de servicios de datos para la MAC con la capa de convergencia. Esta capa se encuentra fuertemente ligada a la subcapa de seguridad.

- Seguridad:

Esta subcapa se encarga de autenticar, establecer las llaves y encriptar. Es en ésta donde se realiza el intercambio de los PDUs de la MAC con la capa física. Más adelante estudiamos como se plantea la seguridad en WiMAX.

La PDU de la MAC es la unidad de datos que intercambian la capa MAC de la BS con la capa MAC de la SS. Consiste en una cabecera de MAC de longitud fija, una carga útil de longitud variable y un ciclo redundante de control (CRC). Hay dos formatos de cabecera totalmente diferenciados por el escudo HT, una cabecera genérica y una cabecera de requerimiento de ancho de banda.

Se utilizan tres tipos de subcabeceras de la MAC:

- i. Subcabecera de gestión de concesión. Es usada por la SS para transportar la gestión de ancho de banda necesaria para su BS.
- ii. Subcabecera de fragmentación. Contiene información que indica la presencia y orientación en la carga útil de cualquier fragmento de SDU.
- iii. Subcabecera de empaque. Usada para indicar el empaquetamiento de múltiples SDUs en un único PDU.

Las cabeceras de gestión de concesión y de fragmentación pueden ser insertadas en el PDU de la MAC inmediatamente después de la cabecera genérica, y así indica el tipo de escudo. La subcabecera de empaque puede ser insertada después de cada SDU de la MAC y es indicada por el tipo de escudo.

Para todo esto hay que tener en cuenta que los datos necesitan por norma una PDU larga y la voz una PDU corta.

- Transmisión de los PDUs de la MAC.

La MAC del estándar IEEE 802.16, soporta varios protocolos de capas de alto nivel como hemos comentado antes (ATM o IP). Para maximizar el proceso haciéndolo flexible y eficaz, se incorporan los procesos de fragmentación y de empaque. El proceso de fragmentación es donde un SDU de MAC es dividido en fragmentos. Y el proceso de empaque es en el cual varios SDUs de la MAC son

empaquetados en una sola carga útil de PDU de la MAC. Ambos procesos pueden ser usados tanto para DL como para UL. El estándar IEEE 802.16 permite el uso de ambos procesos simultáneamente para un uso eficiente del ancho de banda, y fue diseñado para poder soportar tanto FDD como TDD.

La MAC de la BS se encarga de crear un cuadro DL. La ráfaga de datos se transmite en orden de decrecimiento de robustez para permitir que el SS reciba datos confiables antes de arriesgar un error de ráfaga que podría causar pérdida de sincronización. En el DL, una porción del TDM se usa para UGS (unsolicited grant service), es muy útil para aplicaciones constantes de tipo binario con estrictas restricciones de retardo como la VoIP.

- QoS

La calidad de servicio (o QoS, de *Quality of Service* en inglés) es la garantía del cumplimiento de unos niveles de servicio que se contratan entre un proveedor y un usuario de un servicio.

A nivel de capa MAC podemos definir un QoS \rightarrow L2QoS: QoS a nivel MAC.

Cuando la asignación de recursos se hace a nivel 2, el sistema que va asignando los slots de transmisión conoce en todo momento tanto la disponibilidad del medio como la calidad o tráfico neto que es capaz de transmitir para cada usuario. Esto hace posible implementar algoritmos que permitan garantizar de forma absoluta la asignación de tráfico.

La estación base es el nodo maestro de la red, que asigna la transmisión de datos tanto en la bajada hacia los usuarios, DL, como en la subida desde los usuarios, UL. El tener un nodo central permite eliminar la disputa, lo que garantiza que la BS puede, si así se desea, conocer en todo momento la disponibilidad del medio. Además la estación base de WiMAX conoce la calidad del enlace de cada uno de los clientes que tiene conectados, con lo que puede asignar de una forma totalmente determinista el tráfico, tanto en bajada como en subida.

Además de WiMAX, DVB-RCS, un protocolo estándar para el acceso múltiple vía satélite, utiliza también QoS de nivel MAC.

Por otra parte existe también la QoS de nivel 3.

Las técnicas que se usan en este tipo de mecanismos de QoS son los típicos de los TS (*traffic shapers*). Éste clasifica el tráfico que entra en función de los criterios que se establezcan. Se conoce como QoS a nivel IP.

Una vez que el tráfico está clasificado, el TS asigna de una forma estadística los recursos de transmisión al medio. Si la cola de un servicio de baja latencia está muy llena, intentará vaciarla lo más rápido posible o si la cola de un servicio con tasa mínima garantizada tiene paquetes, intentará mantener en promedio a la salida esa tasa.

El problema que presenta esta técnica es que no se conoce con exactitud la capacidad y la disponibilidad del medio sobre el que se transmiten. El tráfico bruto puede depender del usuario al que se transmita, ya que podrían estar más lejos u obstruidos. Usar técnicas no nos puede garantizar una QoS.

Esto quiere decir que si tenemos un servicio de 1Mbps y otro de 2Mbps, la única garantía que puede hacer un sistema de este nivel es que el tráfico del primero va a ser la mitad que el del segundo, pero no puede garantizar cuál va a ser en realidad ese mínimo, ya que desconoce el estado y disponibilidad del medio.

2.1.6 Cobertura de redes WiMAX

Las capacidades y alcances que pueden conseguirse con WiMAX dependen de los siguientes factores:

1. Atenuación de propagación: pérdidas en condiciones de espacio libre, en caso de cobertura NLOS, pérdida adicional por reflexiones y difracciones, para estaciones CPE de interiores, pérdidas por penetración.
2. Atenuación por lluvia, para frecuencias superiores a 8 GHz.
3. Influencia del multitrayecto. En general solo es apreciable para distancias superiores a unos 10 Km, para los cuales la dispersión del retardo puede ser relevante.
4. Características de la estación base. Pueden contemplarse dos opciones:
 - i. Estación base estándar con las características básicas de WiMAX.
 - ii. Estación base de altas prestaciones con diversidad de transmisión/recepción, sistemas avanzados de antenas, subcanalización y mayor potencia de transmisión que la estación convencional.
5. Compromiso capacidad (anchura de banda) ofrecida al usuario y alcance, para una potencia media de transmisión constante.

A modo de ejemplo en la Tabla 2-9 se dan unos valores indicativos de cobertura para un sector de 60° de una BS con una anchura de banda de 3,5 MHz, en la banda de 3-4 GHz, en Km.

Tabla 2-9: Condiciones de Cobertura

<i>Condición de cobertura</i>	<i>Estación base</i>	
	Estándar	Optimizada
LOS	10-16	30-50
NLOS	1-2	4-9
CPE interior	0,3-0,5	1-2

2.1.7 BPSK

Con la transmisión por desplazamiento de fase binaria, BPSK, son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Una fase de salida representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico. Conforme la señal digital de entrada cambia de estado, la fase de la portadora de salida se desplaza entre dos ángulos que están 180° fuera de fase.

Es una forma de modulación de onda cuadrada de portadora suprimida de una señal de onda continua. También se conoce como 2-PSK o PRK (Phase Reversal Keying).

Es la más sencilla de todas, puesto que solo emplea 2 símbolos, con 1 bit de información cada uno. Presenta también mayor inmunidad frente al ruido, puesto que la diferencia entre símbolos es máxima (180°). Dichos símbolos suelen tener un valor de salto de fase de 0° para el 1 y 180° para el 0. En cambio, su velocidad de transmisión es la más baja de las modulaciones de fase. La descripción matemática de una señal modulada BPSK es la siguiente:

$$s(t) = Am(t) \cos(2\pi f_c t)$$

,donde $m(t) = 1$ para el bit 1 y $m(t) = -1$ para el bit 0, A es la amplitud de la portadora y f_c su frecuencia.

Velocidad de transmisión: La velocidad de transmisión de BPSK es baja, debido a que cada símbolo solo aporta un bit de información.

Tasa de errores: La tasa de errores de BPSK es baja, debido a su máxima separación entre saltos de fase. Su tasa de bit erróneo con ruido blanco gaussiano y aditivo se puede calcular de la siguiente manera:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

2.1.8 QPSK

Desplazamiento de fase de 4 símbolos, desplazados entre sí 90°. Normalmente se usan como valores de salto de fase 45°, 135°, 225°, y 315°. Cada símbolo aporta 2 bits. Suele dividirse el flujo de cada bit que forman los símbolos como I y Q.

El diagrama de constelación muestra 4 símbolos equiespaciados. La asignación de bits a cada símbolo suele hacerse mediante el código Gray, que consiste en que entre dos símbolos adyacentes los símbolos solo se diferencian en 1 bit. Esto se escoge así para minimizar la tasa de bits erróneos.

Diagrama de constelación para QPSK con código Gray se muestra en la Figura 2-7.

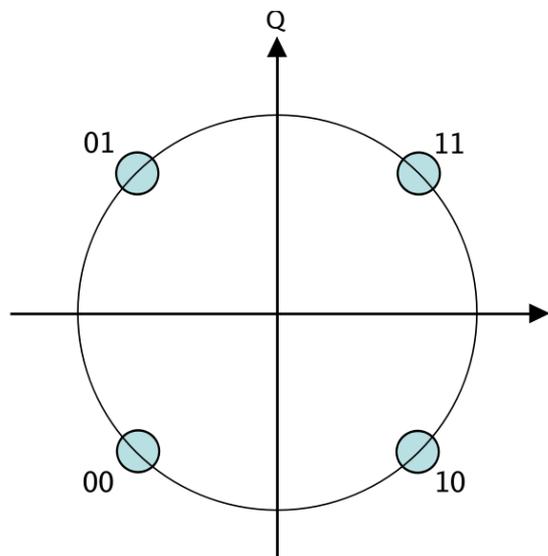


Figura 2-7: QPSK con código Gray

La probabilidad de bit erróneo para QPSK es:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

La tasa de símbolos erróneos se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$P_s = 1 - (1 - P_b)^2 = 2 \cdot Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right) - Q^2\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right)$$

2.1.9 16-QAM

Es una modulación digital en la que el mensaje está contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida.

Una de las características principales de la modulación QAM es que modula la mitad de los símbolos con una frecuencia y la otra mitad con la misma frecuencia, pero desfasada 90° . El resultado de las componentes después se suma, dando lugar a la señal QAM. De esta forma, QAM permite llevar dos canales en una misma frecuencia mediante la transmisión ortogonal de uno de ellos con relación al otro. La componente en cuadratura de esta señal corresponderá a los símbolos modulados con una frecuencia desfasada 90° , y la componente en fase corresponde a los símbolos modulados sobre una portadora sin fase. Se puede observar en la Figura 2-8 las constelaciones para los esquemas de modulación de 16QAM y 64QAM. Para cada uno de ellos se varían los niveles de amplitud y de fase de la señal.

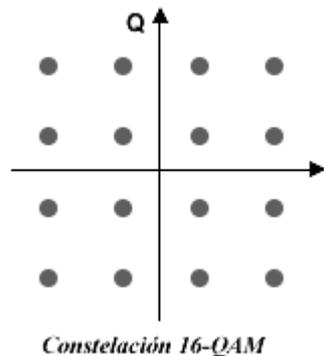


Figura 2-8: Constelación 16-QAM

16QAM permite contar con 16 estados diferentes, mismos que estarán determinados por el número de símbolos mapeados en su constelación correspondiente. Debido a que $16 = 2^4$, cada uno de estos símbolos puede representarse mediante cuatro bits, dos de ellos correspondientes a la componente en cuadratura, y los dos restantes, correspondientes a la componente en fase de la señal. Puesto que existen estas dos componentes, cada una representada por dos bits en 16-QAM, es posible transmitir 4 posibles niveles de amplitud para cada componente, lo que supone que, por el efecto de la cuadratura, pueden transmitirse 16 estados

2.1.10 64-QAM

Es exactamente igual que 16QAM lo que cambia es que tiene 64 estados diferentes como se muestra en la Figura 2-9.

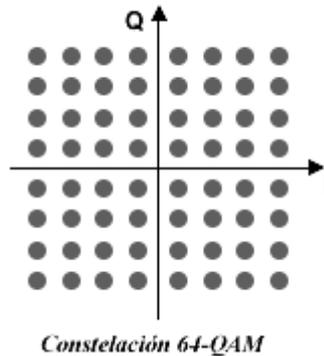


Figura 2-9: Constelación 64-QAM

En cada conexión de usuario es posible elegir el modo de modulación en función de la calidad del canal de ruido.

Se aplica control de potencia, para ajustar esta magnitud al valor más conveniente, en cada caso, al enlace radio. Hay dos modalidades, según que mantengan constantes la potencia de cresta i la potencia media de la constelación.

Se utiliza un filtrado de Nyquist en coseno alzado, con un factor de caída progresiva $\alpha = 0,25$.

2.1.11 OFDM:

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, también llamada modulación por multitono discreto, es una modulación que consiste en enviar un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias donde cada una transporta información la cual es modulada en QAM o en PSK.

Normalmente se realiza la multiplexación OFDM tras pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión, entonces esta modulación se denomina COFDM, del inglés Coded OFDM.

Debido al problema técnico que supone la generación y la detección en tiempo continuo de los cientos, o incluso miles, de portadoras equiespaciadas que forman una modulación OFDM, los procesos de modulación y demodulación se realizan en tiempo discreto mediante la IDFT y la DFT respectivamente.

La modulación OFDM es muy robusta frente al multitrayecto que es muy habitual en los canales de radiodifusión, frente a las atenuaciones selectivas en frecuencia y frente a las interferencias de RF.

Debido a las características de esta modulación, es capaz de recuperar la información de entre las distintas señales con distintos retardos y amplitudes que llegan al receptor, por lo que existe la posibilidad de crear redes de radiodifusión de frecuencia única sin que existan problemas de interferencia.

2.1.12 OFDMA:

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) es una versión multiusuario de la conocida multiplexación por división de frecuencias ortogonales. Se utiliza para conseguir que un conjunto de usuarios de un sistema de telecomunicaciones puedan compartir el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad. El acceso múltiple se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios.

Para conseguir una mayor eficiencia, el sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que éste necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue cancelar de forma eficiente las interferencias co-canal y los desvanecimientos rápidos, proporcionando una mayor eficiencia espectral que OFDM.

2.1.13 Roaming

Roaming permite a los clientes acceder los servicios inalámbricos cuando su propia red no les ofrece cobertura. Esto incluye todos los servicios que se pueden tener en tu red, como por ejemplo, Internet, correo electrónico, voz o vídeo.

Proporciona la capacidad de roaming para el acceso a sus servicios inalámbricos usando la red de un operador que no es su operador de red. Esto es posible gracias a los acuerdos entre operadores.

WiMAX móvil ofrece una visión general de los modelos de negocio y aspectos técnicos del roaming.

— Ventajas de WiMAX móvil

El roaming proporciona importantes ventajas a los clientes y los operadores de red. El roaming puede expandir en grandes proporciones el área de cobertura a disposición de los clientes ya que puede permitir a un operador a ampliar su red.

— Tipos de Roaming

El roaming puede ser nacional o internacional. Se le llama Roaming nacional cuando se produce dentro del mismo país que la red doméstica, e internacional o mundial cuando la red está en un país distinto a la red doméstica.

También puede ocurrir roaming entre redes que utilizan diferentes tecnologías, tales como WiMAX y Wi-Fi o WiMAX y 3G.

— Conexión de Redes para operadores móviles

Dependiendo del roaming que se produzca, las redes de dos operadores deben estar conectados para facilitar el acceso a los servicios y permitir que el proceso de compartir información de uso y para facilitar la solución de facturación y financiera entre los operadores. Esto se puede lograr si por parte de los operadores establecen conexiones directas entre sus redes o mediante la conexión de sus redes a través de un tercer proveedor de intercambio de roaming (WRX). Una de las ventajas de la conexión a través de un tercer proveedor es que puede permitir a un operador que conecta con muchos otros operadores a través de una única conexión.

— Acuerdos de Roaming

Los acuerdos de roaming establecen los términos y condiciones mediante las cuales los operadores se ponen de acuerdo para proporcionar servicios a los demás usuarios que acceden a sus redes. Aquí se detallan los servicios que se prestarán y las tarifas que pagarán los operadores para la utilización de la red del otro. El acuerdo incluye la información relativa a QoS, atención al cliente, facturación y liquidación financiera.

Cuando hablamos de cambios en las estaciones base se llama handoff o handover. Este cambio tiene que producirse en el menor tiempo posible ya que sino el usuario perdería la información que está solicitando en ese momento. Hoy en día los dispositivos a los que se van a implantar la tecnología WiMAX también se es esta instalando GPS, además de las estaciones base, de esta forma tanto las estaciones base como los dispositivos móviles van a saber en todo momento en que celda se encuentran y cuando va a ser el momento de cambiarse por lo que se podrá hacer el cambio de una manera más eficiente.

2.2 Descripción de la estación base

Los componentes principales de la estación base son:

- Antena
- ODU

- IDU

2.2.1 Antenas

Podemos definir antena como un dispositivo que sirve para transmitir y recibir ondas de radio. Su principal función es convertir la onda guiada por la línea de transmisión en ondas electromagnéticas que se pueden transmitir por el espacio libre.

2.2.1.1 Los principales parámetros que describen una antena

— Patrón de radiación

Es un diagrama polar que representa las intensidades de los campos o las densidades de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena, habitualmente se representa el módulo del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada, aunque también se pueden encontrar diagramas de polarización o de fase.

Si el patrón de radiación se traza en términos de la intensidad del campo eléctrico o de la densidad de potencia, se llama patrón de radiación absoluto. Si se traza la intensidad del campo o la densidad de potencia en relación al valor en un punto de referencia, se llama patrón de radiación relativa.

Podemos ver algunos ejemplos de diagrama de radiación en las Figuras 2-10 y 2-11.

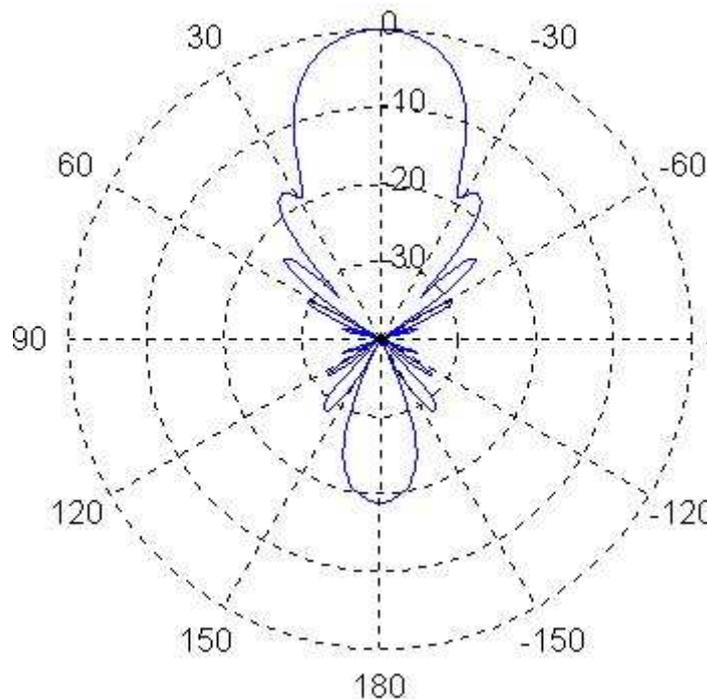


Figura 2-10: Diagrama radiación 2D

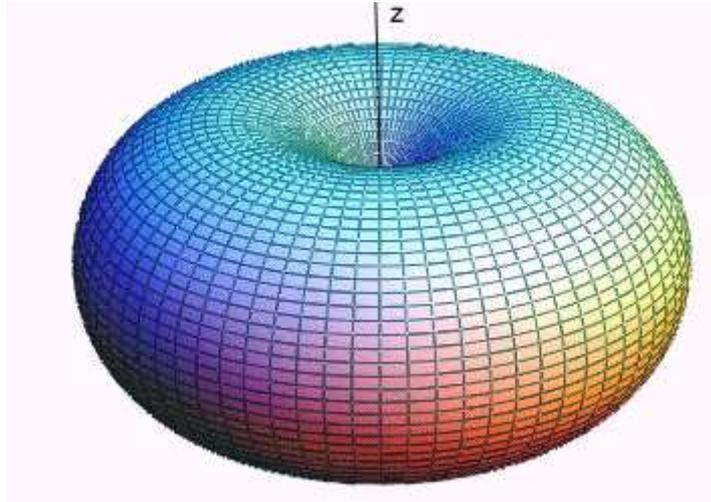


Figura 2-11: Diagrama radiación 3D

— Ganancia directiva y ganancia de potencia

La ganancia directiva es la relación de la densidad de potencia radiada en una dirección en particular con la densidad de potencia radiada al mismo punto por una antena de referencia, suponiendo que ambas antenas irradian la misma cantidad de potencia.

El patrón de radiación para la densidad de potencia relativa de una antena es realmente un patrón de ganancia directiva si la referencia de la densidad de potencia se toma de una antena de referencia estándar, que por lo general es una antena isotrópica. La máxima ganancia directiva se llama directividad.

La ganancia de potencia es igual a la ganancia directiva excepto que se utiliza el total de potencia que alimenta a la antena (o sea, que se toma en cuenta la eficiencia de la antena). Se supone que la antena indicada y la antena de referencia tienen la misma potencia de entrada y que la antena de referencia no tiene pérdidas.

— Polarización de la antena

Las antenas crean campos electromagnéticos radiados. Se define la polarización electromagnética en una determinada dirección, como la figura geométrica que traza el extremo del vector campo eléctrico a una cierta distancia de la antena, al variar el tiempo. Una antena puede polarizarse en forma lineal, en forma elíptica, o circular. La polarización lineal puede tomar distintas orientaciones (horizontal, vertical, $+45^\circ$, -45°). Las polarizaciones circular o elíptica pueden ser a

derechas o izquierdas, dextrógiras o levógiras, según el sentido de giro del campo. Si una antena irradia una onda electromagnética polarizada verticalmente, la antena se define como polarizada verticalmente; si la antena irradia una onda electromagnética polarizada horizontalmente, se dice que la antena está polarizada horizontalmente; si el campo eléctrico gira en un patrón elíptico, está polarizada elípticamente; y si el campo eléctrico gira en un patrón circular, está polarizada circularmente.

— Ancho del haz de la antena

El ancho del haz de la antena es la separación angular entre los dos puntos de media potencia (-3 dB) en el lóbulo principal del patrón de radiación del plano de la antena, va principalmente ligado al diagrama de radiación.

También se puede definir el ancho de haz entre ceros, que es el intervalo angular del haz principal del diagrama de radiación, entre los dos ceros adyacentes al máximo.

En el Anexo tenemos la hoja de especificaciones de una antena.

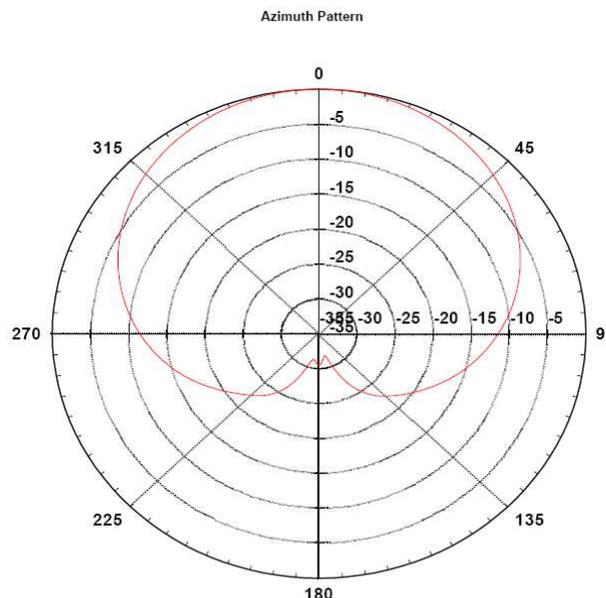


Figura 2-12: Azimut

Como se puede apreciar en la Figura 2 – 12 en el 45° y en 315° (el ancho de haz es de 90°) el valor es de -3dB.

— Ancho de banda de la antena

El ancho de banda de la antena se define como el rango de frecuencias sobre las cuales la antena cumple todas las expectativas.

Normalmente esto se calcula en los puntos donde la potencia cae a la mitad.

En nuestro caso vamos a utilizar antenas direccionales.

2.2.1.2 Antenas Direccionales

Las antenas direccionales son aquellas que favorecen que la mayor parte de la energía sea radiada en una dirección en concreto. Por otra parte puede darse la situación en la que se desee emitir en varias direcciones, pero siempre se habla de un número de direcciones determinado donde se encontrarán el lóbulo principal y los secundarios.

Se componen de uno o más lóbulos principales, dependiendo del número de direcciones en las que queremos emitir, ya que en estos lóbulos es donde se proyecta la mayor energía. En la fabricación nos interesará que el lóbulo principal sea lo más estrecho posible, así ganamos en direccionalidad, aunque esto repercute directamente en el coste económico de la antena ya que se necesita mayor tecnología y precisión en la fabricación.

Por otra parte, por el problema comentado anteriormente de fabricación, además de un lóbulo principal, tendremos unos lóbulos secundarios. Estos lóbulos proyectarán una pequeña parte de energía en direcciones que no son la deseada, o en caso de recepción nos captarán señales que no provienen directamente de nuestra fuente, captando ecos, reflexiones o interferencias de otras fuentes. Normalmente nos interesará una relación entre el lóbulo principal y los secundarios lo más grande posible. En la Figura 2-13 se muestra un ejemplo de la antena direccional.

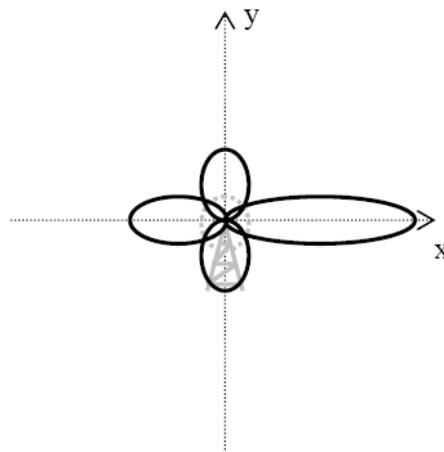


Figura 2-13: Antena direccional

Como se puede observar la mayor parte de la potencia se dirige en el eje x hacia el lado positivo, mientras que en las otras cuatro direcciones la potencia de emisión es bastante menor.

Otra característica de la antena principal es que como solo emitimos por los lóbulos principales nuestra información no se difunde por todas las direcciones. Así nuestra información llega solo al punto deseado de otra forma cualquier persona en otro punto podría conseguir nuestra emisión, poniendo en peligro nuestros datos.

Otra ventaja importante es que de este modo evitamos la saturación de frecuencias, ya que si usamos una frecuencia en un camino muy recto entre dos antenas direccionales dejamos el resto de espacio disponible para usar esa misma frecuencia.

Son las mejores opciones para una conexión Punto-a-Punto, acoplamientos entre los edificios, o para los Clientes de una antena omnidireccional.

Su forma las hace muy adecuadas para una gran direccionalidad y evitan que la señal se desvanezca en el vano. Usando un reflector con forma parabólica se consigue que la señal que se radia de forma radial pase a ser una onda plana, así desaparece la dispersión de la energía en la distancia.

La antena actúa como se muestra en la Figura 2-14.

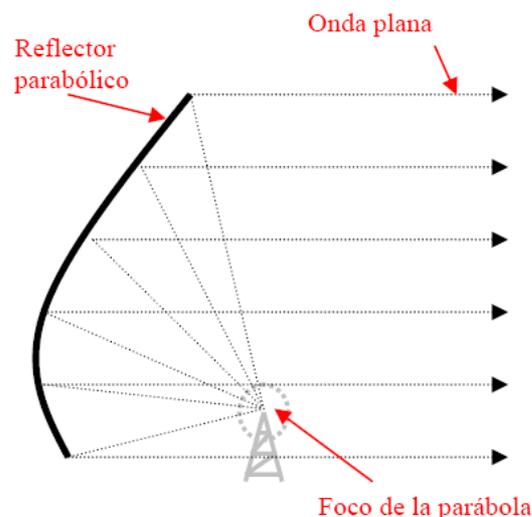


Figura 2-14: Funcionamiento de antena directiva

Vamos a utilizar una antena direccional sectorial pero que tiene una apertura de 120° . Las antenas sectoriales emiten un haz más amplio que las antenas direccionales pero no tan amplio como una omnidireccional, que emite en los 360° . La ganancia de la antena sectorial es mayor que la omnidireccional.



Figura 2-15: Antena sectorial

Para tener una cobertura de 360°, como es nuestro caso, y un largo alcance, deberemos instalar tres antenas sectoriales de 120°. Las antenas sectoriales suelen ser más costosas que las antenas direccionales u omnidireccionales.

Dentro de estas se pueden destacar, las antenas adaptativas o inteligentes, utilizan múltiples elementos de antena que gestionan la interferencia y ruido recogido con el objetivo de maximizar la recepción de la señal. El patrón del haz varía con el entorno del canal. Dependiendo de las necesidades el haz de la antena se adapta para llegar más lejos con un haz más estrecho o ensancha el haz y no es capaz de llegar tan lejos.

2.2.2 ODU e IDU

El sistema se compone de dos partes más, IDU y ODU (InDoor y OutDoor Unit), la unidad externa se monta en la junto a la antena en el mástil y la interna se monta en un rack el cual dependiendo de la situación de la estación base, se encontrara dentro de una caseta que debe cumplir una serie de requisitos ya que los equipos son muy delicados ante los agentes meteorológicos y temperaturas extremas, o bien en un rack diseñado especialmente para exteriores. En ambos casos es muy importante tener en cuenta las condiciones atmosféricas.

La ODU siempre está cerca de la antena, o pegada a ésta, depende del equipo que estemos utilizando.

La ODU es la encargada de tras coger la señal en banda base de la IDU, la modula a la frecuencia deseada, en nuestro caso tomamos 2,5 GHz, la amplifica y filtra para mandarla a la antena. En recepción hace lo mismo, recoge la señal de la antena la filtra a la frecuencia de trabajo, la amplifica y la pasa a banda base para dársela a la IDU.

La conexión entre la ODU y la antena se hace mediante una guía de onda.

La guía de onda es una estructura que consiste en tan solo un conductor. Hay más de dos tipos pero las que se suelen usar más de sección rectangular y de sección circular. La Figura 2-16 muestra una guía de onda rectangular y la Figura 2-17 una de sección circular.



Figura 2-16: Guía de onda rectangular



Figura 2-17: Guía de onda circular

Ventajas:

- Blindaje total, eliminando pérdidas por radiación.
- No hay pérdidas en el dieléctrico, pues no hay aisladores dentro.
- Las pérdidas por conductor son menores, pues solo se emplea un conductor.
- Mayor capacidad en el manejo de potencia.
- Construcción más simple que un coaxial

Desventajas:

- La instalación y la operación de un sistema de guías de onda son más complejas. Por ejemplo:
 - Los radios de curvatura deben ser mayores a una distancia para evitar atenuación, ya que cuanto más cerrada es la curva mas pérdidas tenemos.

- Considerando la dilatación y contracción con la temperatura, se debe sujetar mediante soportes especiales.
- Se debe mantener sujeta a presurización para mantener las condiciones de uniformidad del medio interior.
- Si no son de metal se deterioran muy rápido debido a las condiciones climatológicas.

En todos los casos, la IDU se monta sobre un rack poniendo en este las conexiones de fuerza.

La IDU es la encargada de procesar y preparar la señal, se la entrega a la ODU en banda base.

La IDU y la ODU normalmente se han interconectado hasta el momento con cable coaxial, que se sigue haciendo, pero dependiendo de los equipos también se pueden conectar con un cable híbrido ya que debe subir la energía suficiente para alimentar a la ODU, y los datos que tenemos que enviar.

El rack es el encargado de distribuir la corriente para todos los equipos de la instalación, utilizando en esta corriente continua y alterna, para mayor seguridad ante cortes, ya que esto supondría una pérdida de dinero, se instalan baterías y un generador alimentado por gasoil para casos extremos, asegurándonos que aunque haya un gran corte en el suministro tendremos un flujo de corriente constante, además en el rack en el que instalamos la IDU tenemos los módulos de las alarmas y la distribución de los datos ya que los que requieren los usuarios entran por la red general, no por las antenas WiMAX.

Como podemos ver en la Figura 2-18 el cable es híbrido, lleva a la vez datos y corriente eléctrica para la ODU.

En el uno de los casos, la IDU se encuentra dentro de una caseta, ya sea esta prefabricada o de obra, la sala tiene que estar perfectamente acondicionada, ya que el rack tiene que estar en un rango de temperaturas, en estos casos lo más preocupante es el calor por lo que se tiene que poner un aparato de aire acondicionado que regule la temperatura constantemente para el verano, porque al ser una sala cerrada no circula el aire y los equipos pueden fundirse.

En otro caso, la IDU este a la intemperie, la caja en la que se instala es una caja especial para evitar los problemas mencionados anteriormente, una de las propiedades de esta es que las paredes de la caja son dobles de acero y de aluminio, que disipan muy bien el calor y aíslan los equipos totalmente de la lluvia, este

diseño por poner un ejemplo que con una radiación solar de $1100\text{W}/\text{m}^2$ tan solo penetren 145W .

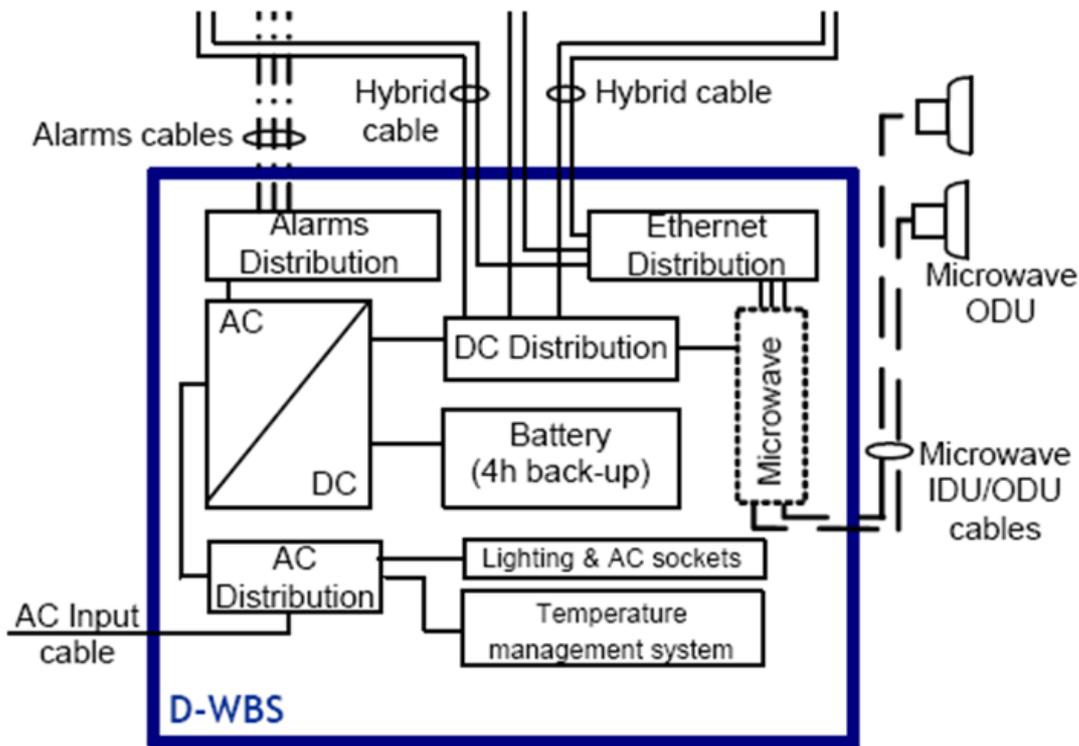


Figura 2-18: Interior Rack de la IDU

Por otro lado para la imprimación del exterior se usa una pintura especial llamada CORROCOAT-PE, que refleja gran parte de la luz del sol, y es la mejor opción para exterior por sus especificaciones tanto de humedad como de resistencia a los rayos ultravioleta.

En la Figura 2-19 se puede observar que la puerta de la caja tiene aberturas para que circule el aire en épocas cálidas, para evitar el efecto invernadero dentro de ésta.

En este caso es muy importante el mantenimiento ya que las condiciones meteorológicas adversas deterioran esta caja de manera grave, y para evitar roturas en los equipos el mantenimiento debe ser continuo.

Dependiendo de la situación se elige la mejor opción, por ejemplo si estamos en un entorno rural seguramente, también dependiendo del presupuesto, se debería optar por una caseta de obra o prefabricada, mientras si estamos en lo alto de un edificio al que muy pocas personas pueden acceder se podría optar por una caja externa.

Para la instalación de la antena, independientemente del tipo que sea se utiliza un mástil, el cual puede variar dependiendo de la situación. Destacan principalmente dos tipos de mástiles, uno llamado torre, Figura 2-20, que sirve para poner más de una antena en él y otro más pequeño para situar tan solo una antena, Figura 2-21.



Figura 2-19: Caja exterior para IDU



Figura 2-20: Torre



Figura 2-21 Mástil simple

2.2.3 Equipos Terminales

Hasta ahora hemos comentado tan solo como funciona la red WiMAX, pero sólo hasta el hogar, en esta sección vamos a ver como el usuario se conecta a la red.

Para la estación base vimos que siempre necesitábamos tanto la IDU como la ODU pero en el caso del usuario podemos distinguir tres casos diferentes, el usuario necesita una IDU con antena exterior, el usuario solo necesita una IDU, sin antena exterior, y el usuario tiene la IDU integrada en algún dispositivo móvil. En los tres casos la IDU es mucho más barata y con tecnología mucho más sencilla que la de la estación base.

En el primer caso, significa que el usuario está lejos de la estación base o del repetidor por lo que necesita una antena para aumentar la ganancia, en la parte exterior solo tenemos la antena, que con un cable coaxial conectamos la IDU. En la Figura 2-22 se muestra como quedaría la antena del usuario.



Figura 2-22: Antena exterior de usuario

Con esto conseguiríamos algo muy parecido a lo que tenemos hoy en día en casa con el ADSL, entendiendo el router como la IDU, esta IDU de WiMAX nos permitiría tener televisión IP, teléfono a conexión a Internet por banda ancha. Ya que nos puede ofrecer velocidades bastante más altas que una ADSL convencional.

En el segundo caso, si nuestro hogar está lo suficientemente cerca de la estación base o el repetidor conseguimos tener la misma velocidad que en el caso anterior pero evitándonos la antena exterior. Obteniendo los mismos servicios. En la Figura 2-23 se muestra como sería la IDU de un usuario, es decir, el equipo que tiene que tener en casa.



Figura 2-23: IDU

Para terminar con el tercer caso el chip va integrado por lo que podremos estar en cualquier sitio con cobertura y nuestro dispositivo nos podrá dar distintos servicios.

Hoy en día empresas como Intel está instalando junto con la tecnología Wi – Fi , un chip para WiMAX en todos los dispositivos portátiles como ordenadores, notebooks, con lo que teniendo cobertura conseguiríamos tener una conexión realmente móvil, se puede afirmar esto ya que con Wi – Fi no tenemos realmente movilidad, no nos podemos desplazar más de un rango de decenas de metros.

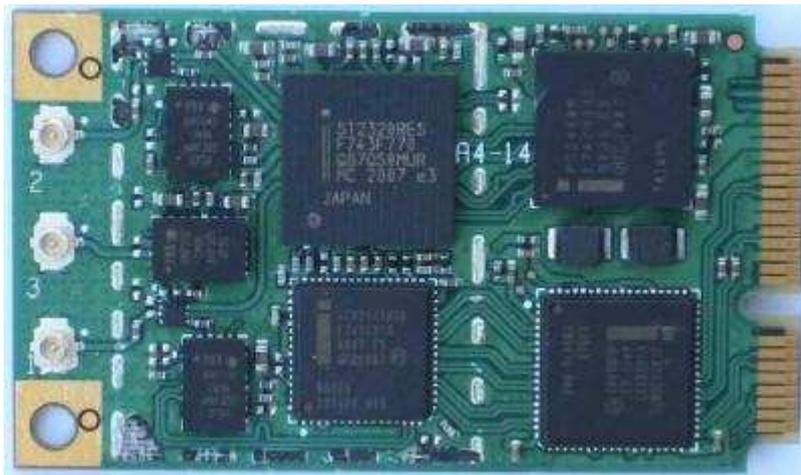


Figura 2-24: Chip WiFi-WiMAX

Aunque si nuestro dispositivo no lo tiene interno y optamos por la conexión a una red de tipo WiMAX, tenemos por ejemplo adaptadores por PCMCIA como por ejemplo la que se muestra en la Figura 2-25.

Otras empresas como Nokia instalan esta tecnología en los teléfonos móviles con el fin de poder conectarse a una red en cualquier lugar. Como puede verse en la Figura 2-26.

El usuario para conectarse a la red tendría que tener un nombre de usuario y una clave o contraseña, que se le daría al pagar una cuota mensual.



Figura 2-25: PCMCIA



Figura 2-26: Teléfono móvil con WiMAX

3 Diseño, Resultados y Simulación

3.1 Simulación en MatLab

En un principio la simulación solo íbamos a tener dos tipos de escenarios como dice el título del proyecto, pero una vez que ya estaba todo terminado introducir un tercer escenario no era para nada complicado y se tomó esta decisión.

Finalmente obtenemos tres escenarios, una zona rural, una zona costera, entendemos como la zona costera la zona del puerto, no una ciudad con costa, y una ciudad. Lo que diferencia a estas tres es principalmente los obstáculos, en una zona costera no tenemos ningún obstáculo ni de edificios, ni accidentes geográficos que nos interfieran en nuestro proyecto, en la zona rural sí podemos hablar de obstáculos pero no muy voluminosos ni muy altos. Para terminar en la ciudad sí que destacan grandes edificios con nos harán muchas reflexiones, por lo que este será el peor de los 3 casos.

Para la simulación de los escenarios partimos de un cluster de 7, esto quiere decir que utilizamos 7 conjuntos de frecuencias diferentes, pero como tenemos en cada celda 3 sectores, el número total de bandas de frecuencias será de $7 \cdot 3 = 21$ bandas de frecuencias en nuestra red.

La simulación la hemos dividido en dos partes, en una hacemos el cálculo de la ciudad y de la zona rural y en la otra hacemos el cálculo de la zona costera. Esto lo hacemos así porque sabemos que en el primer caso (zona rural y costera) vamos a tener estaciones que se interfieren entre ellas, por el contrario en el puerto hemos asumido que no vamos a tener ninguna estación interferente.

Empezamos analizando la ciudad y zona rural:

Marcamos las pautas de cómo hacer la simulación, al ser todo simétrico analizaremos tan solo un ángulo de 120° suponiendo que los otros 240° van a ser iguales.

Para la simulación de cada radio partimos del 1% hasta el 90%, partimos del 1% para evitar problemas con el software en la simulación y llegamos al 90% ya que al ser un sistema multicelda, las celdas tienen forma hexagonal por lo que con el 90% hacemos la simulación perfecta.

Cada sector de 120° y de radio el que nosotros queramos, lo dividimos en zonas más pequeñas para hacer el estudio lo más exhaustivo posible, en nuestro caso de 3° , y lo dividimos en círculos concéntricos, por lo que finalmente vamos a tener para cada radio una malla de sectores circulares, dependiendo del número que

le digamos, en secciones de 3°. En cada una de dichas zonas vamos a calcular la relación señal a ruido interferencia, SINR, con la siguiente ecuación, estando el SINR en números naturales:

$$\text{sinr} = \frac{s}{(\text{interferencia 1} + \text{interferencia 2} + \text{nn})}$$

Siendo s la señal, interferencia1 e interferencia2 las señales interferentes cocanal de clusters y nn el nivel de ruido. Luego esta señal la pasamos a dB, esta fórmula la aplicamos a cada sector de 3° que hemos mencionado antes. Para que WiMAX pueda funcionar necesitamos que esta relación este por encima de 6,4 dB en la que utilizamos la modulación BPSK. En la Tabla 3-1 se muestra, dependiendo de la SINR la modulación utilizada, con su correspondiente FEC:

Tabla 3-1: Modulaciones

SINR (dB)	Modulación	FEC
6,4	'BPSK'	1/2
9,4	'QPSK'	1/2
11,2	'QPSK'	3/4
16,4	'16-QAM'	1/2
18,2	'16-QAM'	3/4
22,7	'64-QAM'	2/3
24,4	'64-QAM'	3/4

La ecuación para cada elemento de la ecuación del SINR es:

— Para la señal:

$$s = 10^{((P_{tx}(dB) - L_p(dB) + G_{tx}(dB) + G_{rx}(dB))/10)}$$

s: la señal,

P_{tx}: la potencia de transmisión en dBm,

G_{tx}: la ganancia de la antena transmisora en dB, dependiendo del punto al que estemos apuntando, esta ganancia variara, para esto hemos creado una función

llamada antenas que dependiendo del tipo de antena y del ángulo nos varia la ganancia.

G_{rx} : la ganancia de la antena receptora en dB,

L_p : las pérdidas de propagación en dB.

$$L_p = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d \cdot 1000 / d_0) + PLf + PLh$$

A: factor de corrección, $d_0 = 100$, punto de referencia

$$A = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d_0}{\lambda}\right)$$

d: distancia

PLf: término de corrección de frecuencias

$$PLf = 6 \cdot \log_{10}(f / 2000)$$

PLh: término de corrección de altura de antena receptora

$$PLh = -10,8 \cdot \log_{10}(h / 2) \quad h = 2$$

— Para las interferencias:

$$\text{interferencia} = 10 \wedge ((P_{tx}(dB) - L_p(dB) + G_{tx}(dB)) / 10)$$

P_{tx} : potencia de transmisión de la estación interferente

L_p : las pérdidas de propagación en dB.

G_{tx} : ganancia de la antena transmisora.

Para el puerto quitamos las estaciones interferentes además de cambiar las perdidas, poniendo las siguientes:

Si la distancia es menor que R_b

$$L_p = L_{un} + 20 \cdot \log_{10}(d \cdot 1000)$$

L_{un} : Pérdidas a un metro

$$L_{un} = 20 \cdot \log_{10}(4 \cdot \pi / \lambda)$$

R_b : Distancia

$$R_b = 4 \cdot h_b \cdot h / \lambda$$

Si la distancia es mayor que R_b , tenemos dos casos posibles:

i. Si la distancia es mayor que 0,9 LOS las pérdidas son las siguientes:

$$L_p = L_{un} + 20 \cdot \log_{10}(R_b) + 40 \cdot \log_{10}(d * 1000 / R_b) + 20 * (((d * 1000 - (0,9 * LOS)) / (0,1 * LOS)))$$

ii. Para el resto de los casos las pérdidas son:

$$L_p = L_{un} + 20 \cdot \log_{10}(R_b) + 40 \cdot \log_{10}(d * 1000 / R_b)$$

Hay que ponderar ésta última ya que ésta tiene un ángulo de salida y suponemos que en la antena receptora, el haz entra por el lóbulo secundario.

Para hacer las ponderaciones de las antenas hemos hecho una función, llamada *antenas*, que dependiendo del tipo de antena que queramos utilizar 60°, 90° o 120° nos cambia las ganancias de las antenas.

Que la antena sea de 60°, 90° o 120° no significa que esa sea la anchura de su haz, sino que en la apertura del haz de 60°, 90° o 120° la ganancia pierde 3 dB.

El *sinr* lo pasamos a dB ya que con los cálculos que hemos hecho antes lo tenemos en unidades naturales.

Creamos otra función llamada *calculo_tasas* con la que sabiendo el FEC, la modulación, el ancho de banda utilizado, en nuestro caso 10 MHz, la eficiencia del espectro, del 80%, y la tasa obtenemos para cada punto la tasa en Mbps, esta misma función nos calcula la media para ese sector.

El factor a utilizar para las modulaciones es el mostrado en la Tabla 3-2.

Una vez que tenemos la velocidad media que podemos tener en cada sector decidimos dejar el 75% para el downlink.

Por otra parte hemos calculado que un usuario medio que pueda acceder a nuestra red realizará el siguiente gasto:

- Aproximadamente 15 mails a 0,1MB cada uno.
- Lectura de 50 páginas web 500kB de media.
- Visualización de 2 videos a 3 MB.
- 15 MB para cosas extras.
- Lo que nos deja un total de 42,5 MB diarios/persona.

Tabla 3-2: Factor de Modulación

Modulación	Factor
'BPSK'	1
'QPSK'	2
'QPSK'	2
'16-QAM'	4
'16-QAM'	4
'64-QAM'	6
'64-QAM'	6

Para calcular las conexiones que tendríamos por sector utilizamos la siguiente fórmula:

$$\text{conexiones} = \text{velocidadDL} * \text{conversión} * \text{ftime} / (\text{total} * 8)$$

velocidadDL: velocidad media de descarga.

ftime: factor de tiempo. En nuestro caso hemos utilizado 70%

total: son los megas que hemos calculado por usuario medio

conversión: 60*60*24 lo utilizamos para pasar el tiempo a segundos.

En el programa lo que hacemos es que el total lo multiplicamos por 8 para pasarlo a bits, ya que todas las fórmulas utilizadas nos dan las velocidades en bits/seg.

Tras hacer todo esto calculamos los porcentajes de cada tipo de modulación.

Hemos hecho simulaciones para todos los casos de zona rural y ciudad, tanto en radio como utilizando todos los tipos de antenas posibles. En radio mostramos solo hasta donde el SINR es aproximadamente de 6,4 dB ya que ese es el límite de la última modulación BPSK. En este caso la potencia de transmisión es de 10 W y la ganancia de la antena de recepción es de 10 dB.

Para finalizar, utilizando la función de MatLab contourf dibujamos el SINR en dB y también una grafica con las conexiones medias que podríamos tener en cada caso.

El SINR representado en las siguientes Figuras es siempre para un sector, el resto de los sectores son iguales.

3.1.1 Tipo A (Ciudad)

3.1.1.1 Antena de 90°

Radio = 1 km mínimo SINR: 39.2019 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

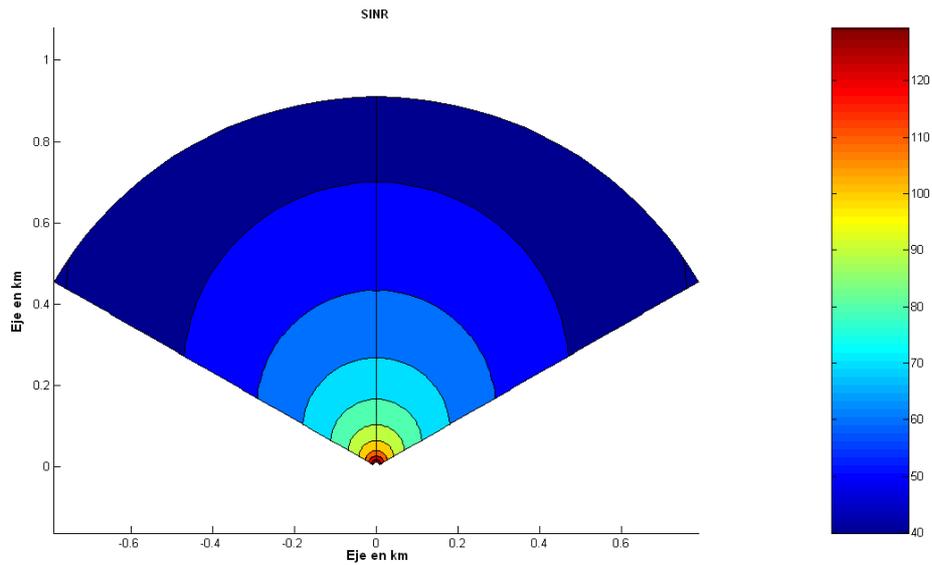


Figura 3-1: Ciudad Antena 90° Radio 1 km

Radio = 2 km mínimo SINR: 24.7675 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

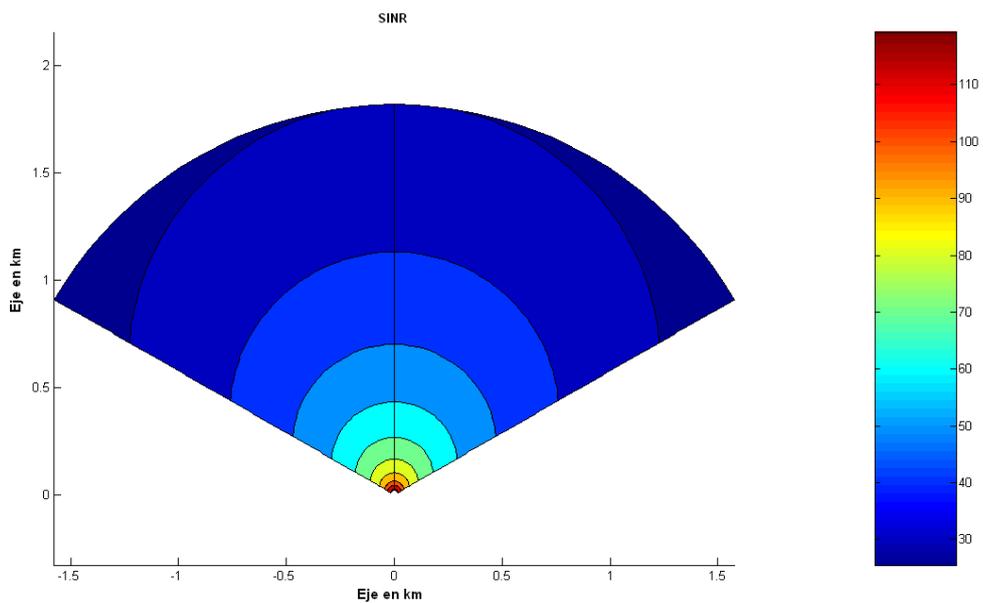


Figura 3-2: Ciudad Antena 90° Radio 2 km

Radio = 3 km mínimo SINR: 16.3240 dB media de bajada: 26.1537 Mbps

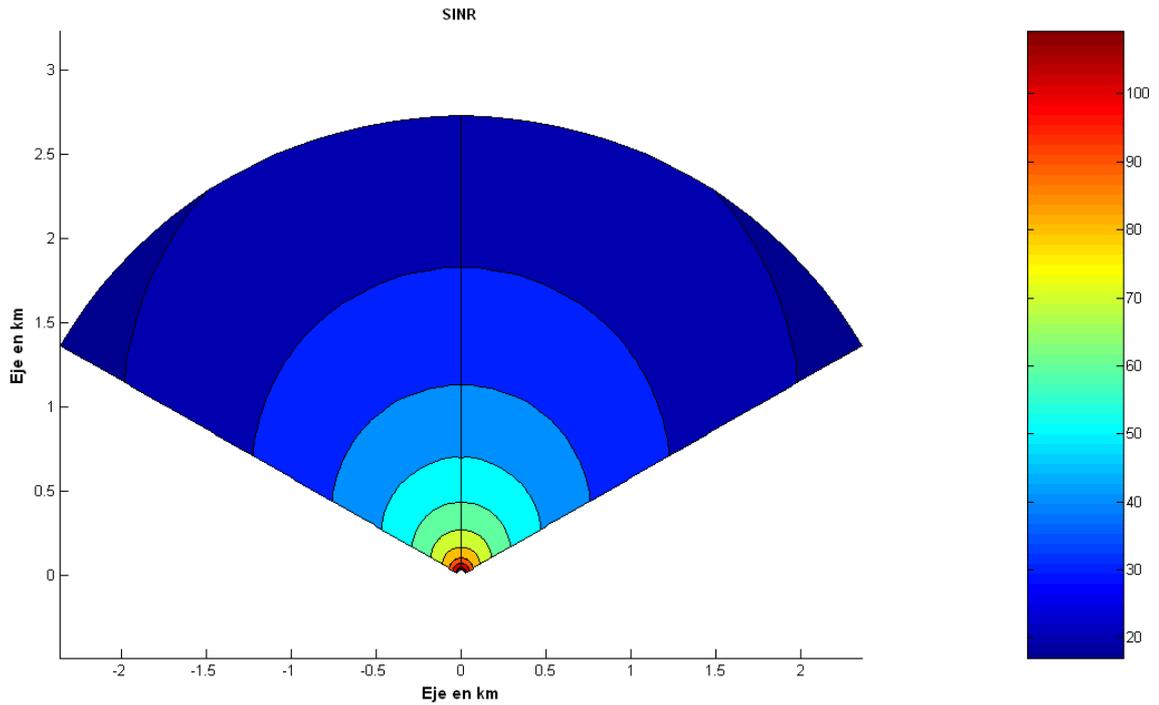


Figura 3-3: Ciudad Antena 90° Radio 3 km

Radio = 4 km mínimo SINR: 10.3332 dB media de bajada: 21.8974 Mbps

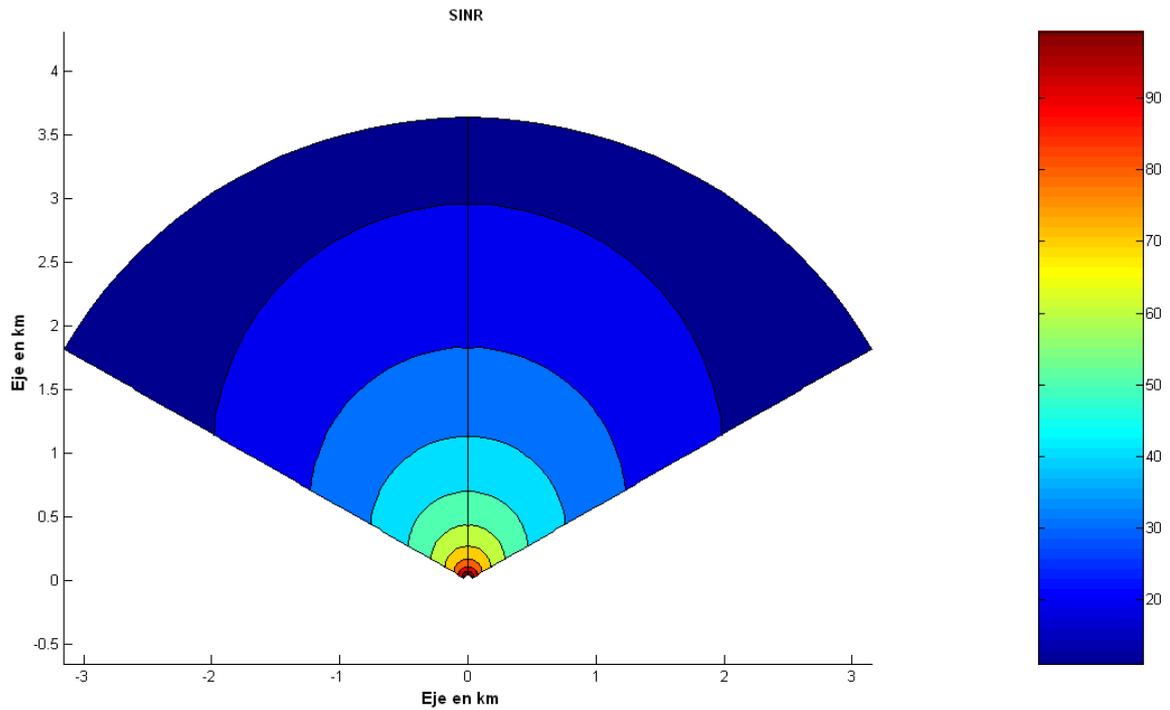


Figura 3-4: Ciudad Antena 90° Radio 4 km

Radio = 5 km mínimo SINR: 5.6863 dB media de bajada: 17.6051Mbps

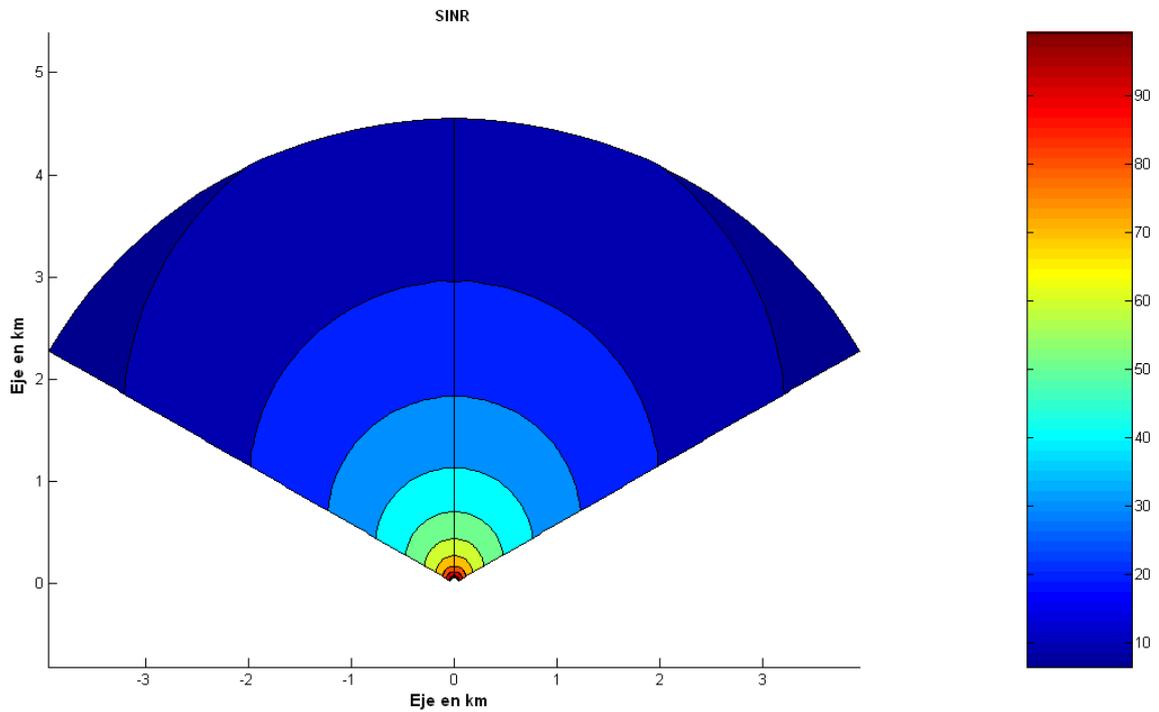


Figura 3-5: Ciudad Antena 90° Radio 5 km

Gráfico de las conexiones:

En la Figura 3 – 6 se muestra el número de conexiones que se pueden servir en función del radio de la celda.

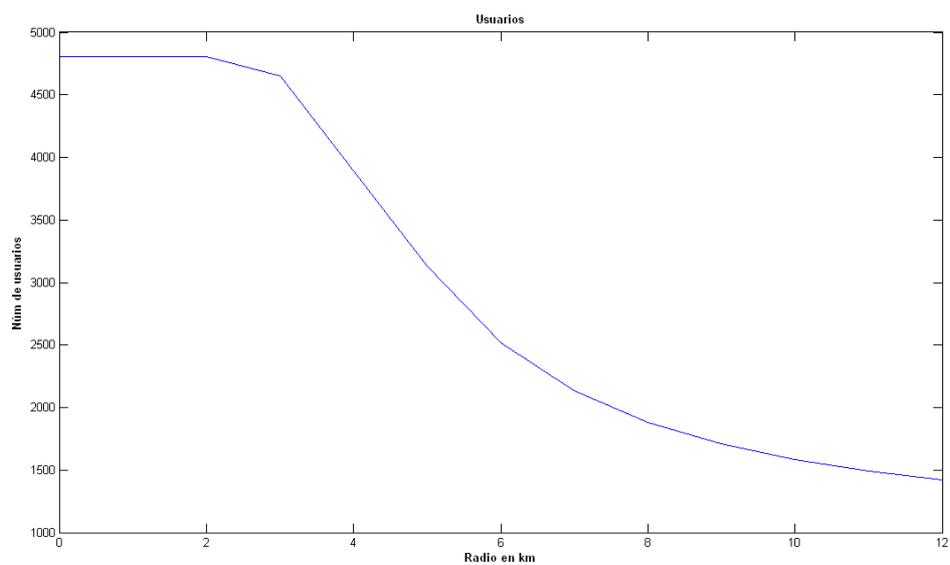


Figura 3-6: Conexiones 90° Ciudad

3.1.1.2 Antena de 60°

Radio = 1 km mínimo SINR: 29.9343 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

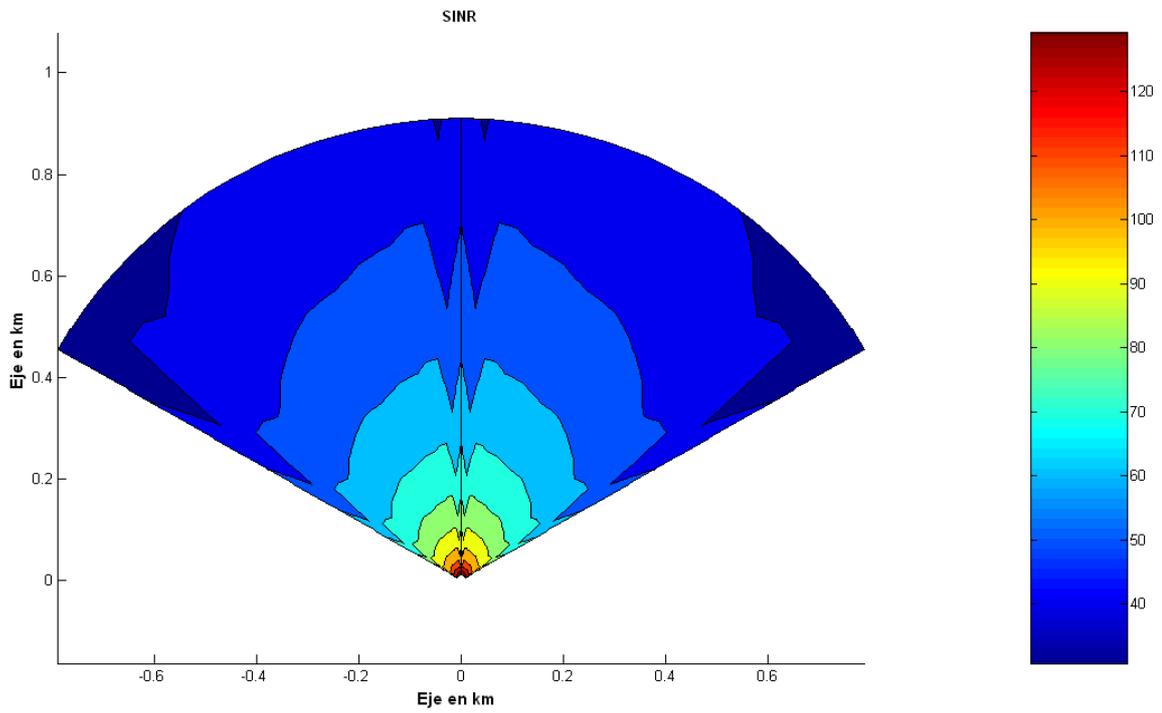


Figura 3-7: Ciudad Antena 60° Radio 1 km

Radio = 2 km mínimo SINR: 15.4999 dB media de bajada: 26.7938 Mbps

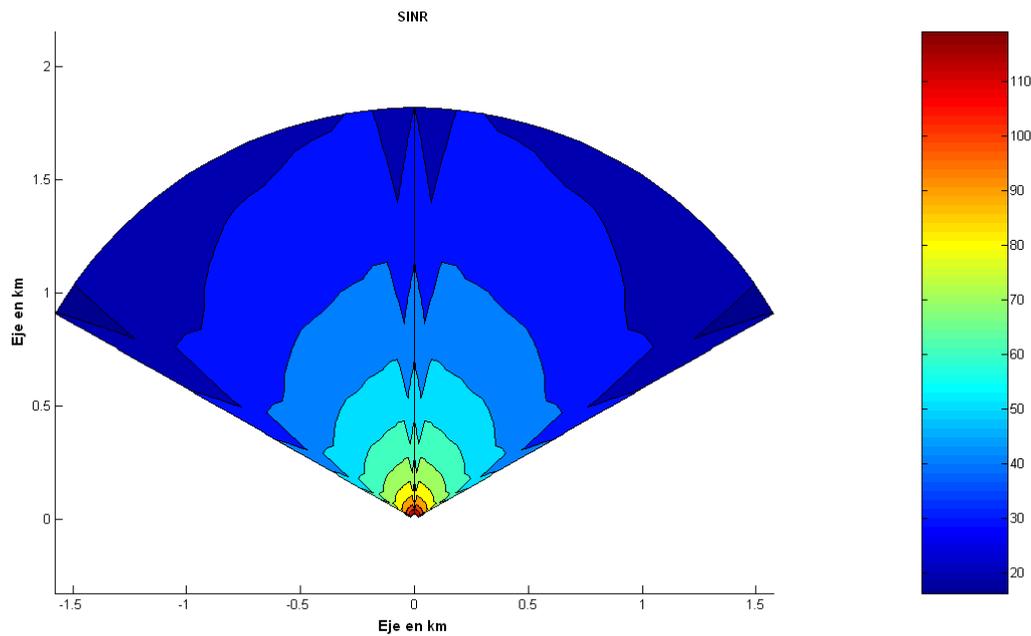


Figura 3-8: Ciudad Antena 60° Radio 2 km

Radio = 3 km mínimo SINR: 7.0563 dB media de bajada: 24.4035 Mbps

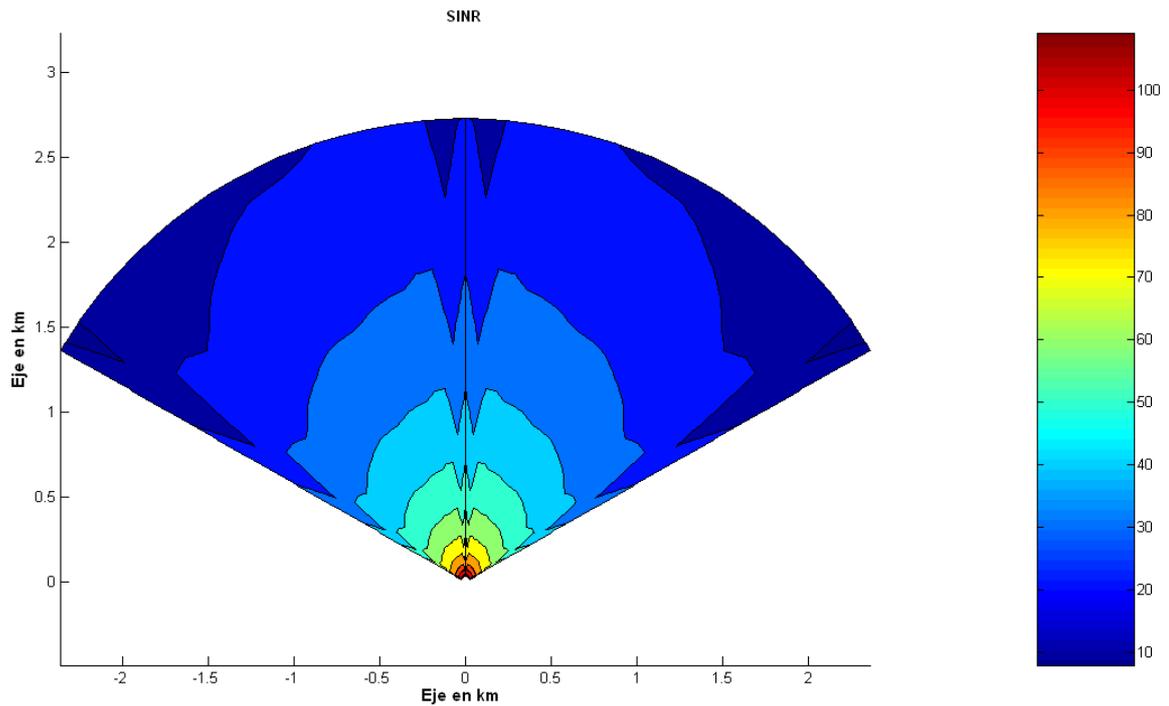


Figura 3-9: Ciudad Antena 60° Radio 3 km

Gráfico de las conexiones:

En la Figura 3 – 10 se muestra el número de conexiones que se pueden servir en función del radio de la celda.

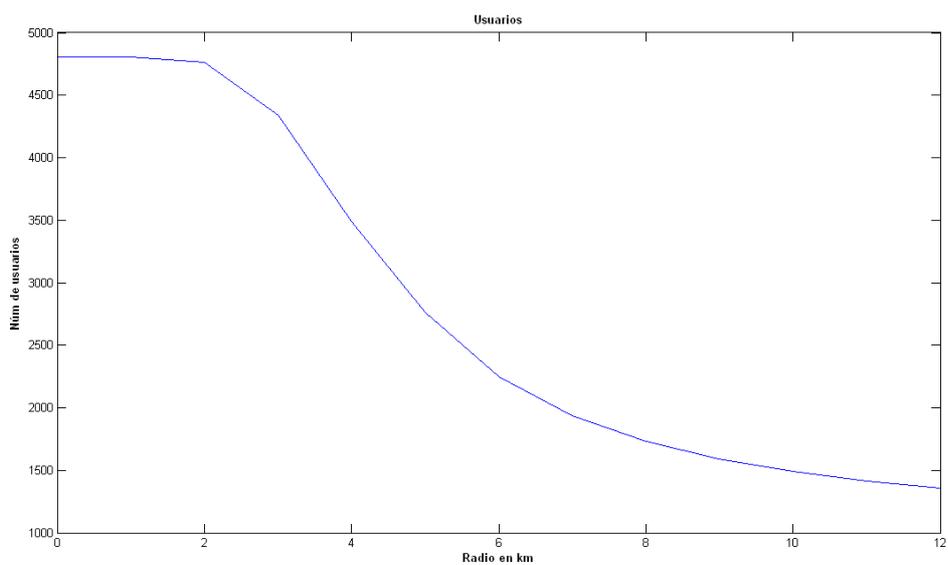


Figura 3-10: Conexiones 60° Ciudad

3.1.1.3 Antena de 120°

Radio = 1 km mínimo SINR: 41.5303 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

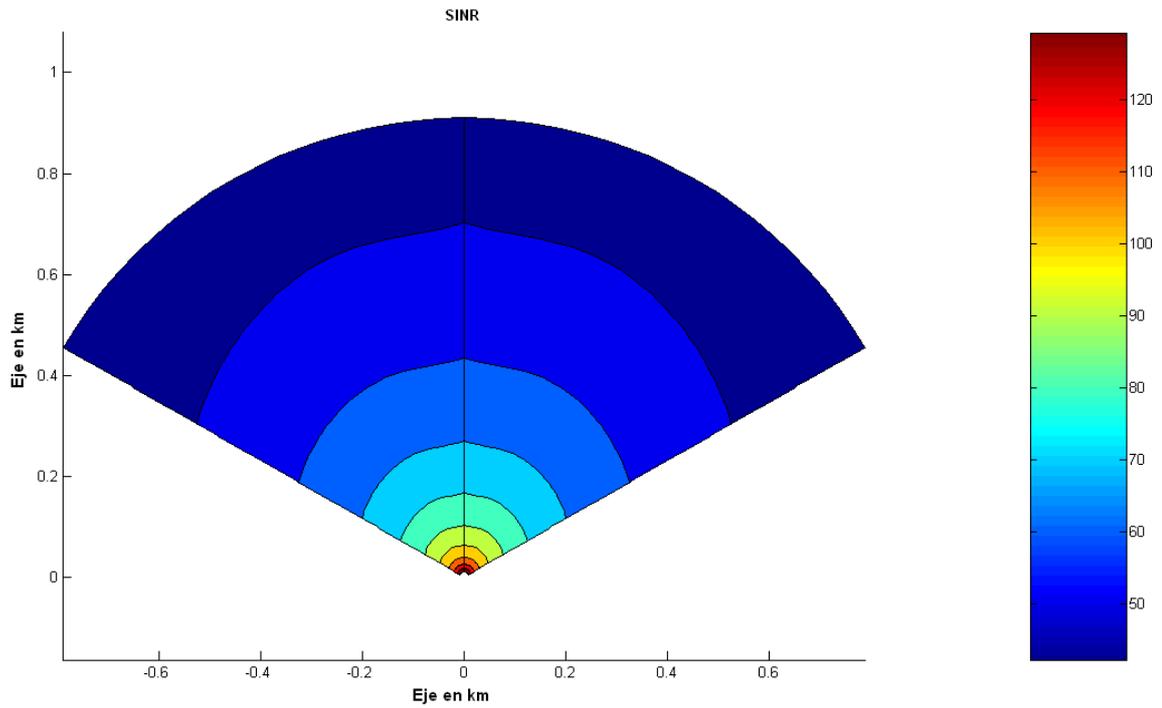


Figura 3-11: Ciudad Antena 120° Radio 1 km

Radio = 2 km mínimo SINR: 27.0959 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

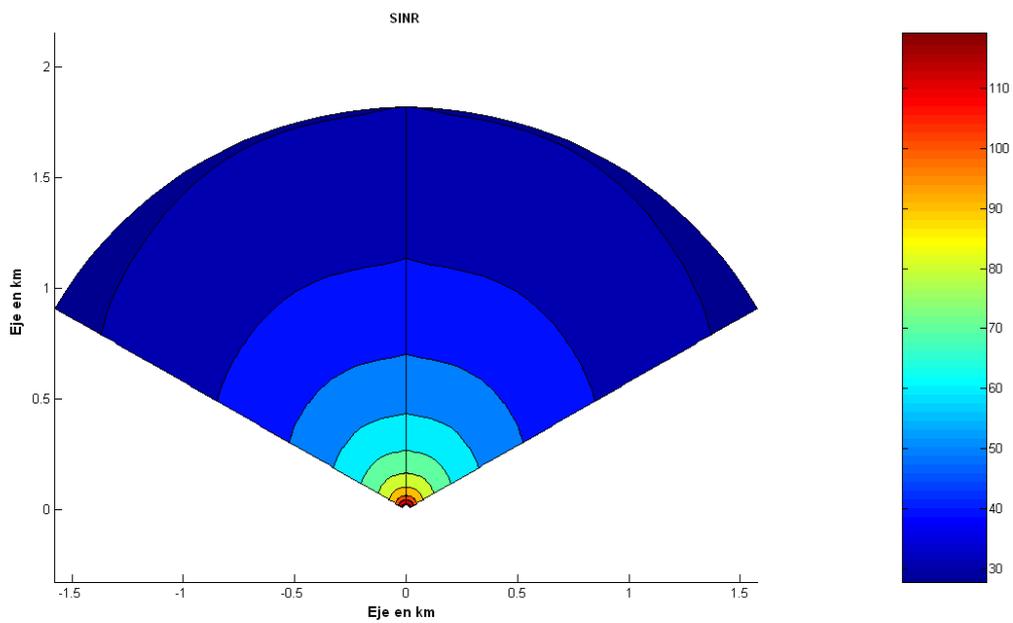


Figura 3-12: Ciudad Antena 120° Radio 2 km

Radio = 3 km mínimo SINR: 18.6523 dB media de bajada: 26.4324 Mbps

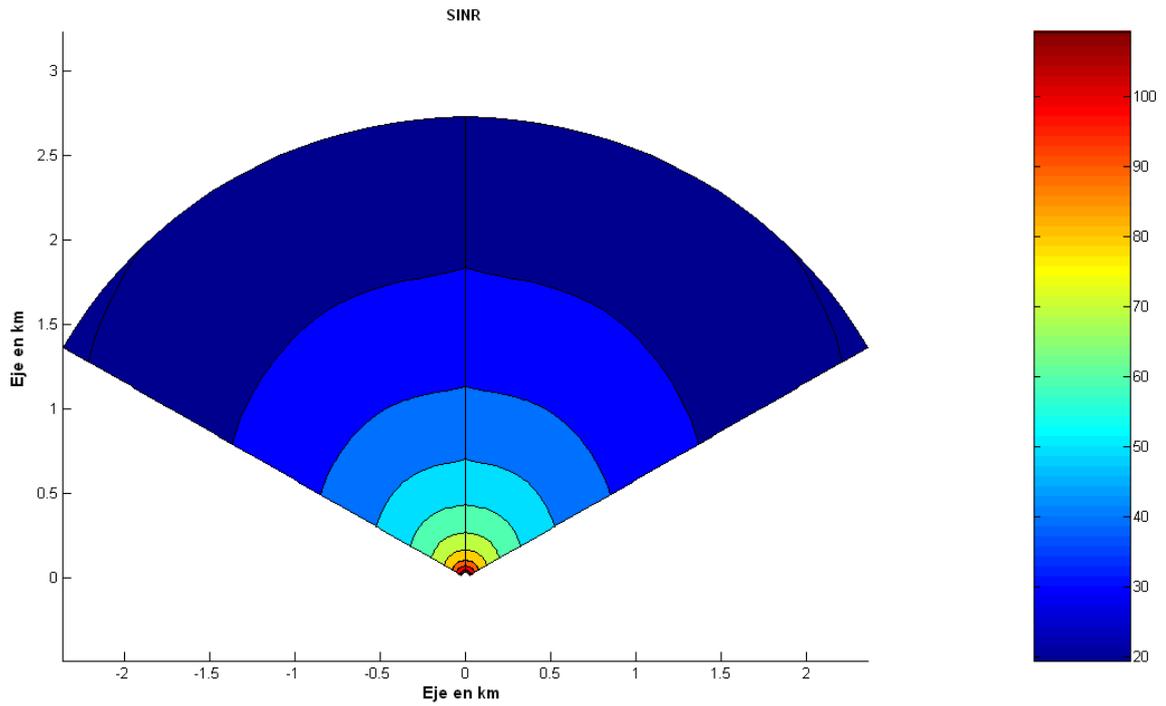


Figura 3-13: Ciudad Antena 120° Radio 3 km

Radio = 4 km mínimo SINR: 12.6615 dB media de bajada: 22.5457 Mbps

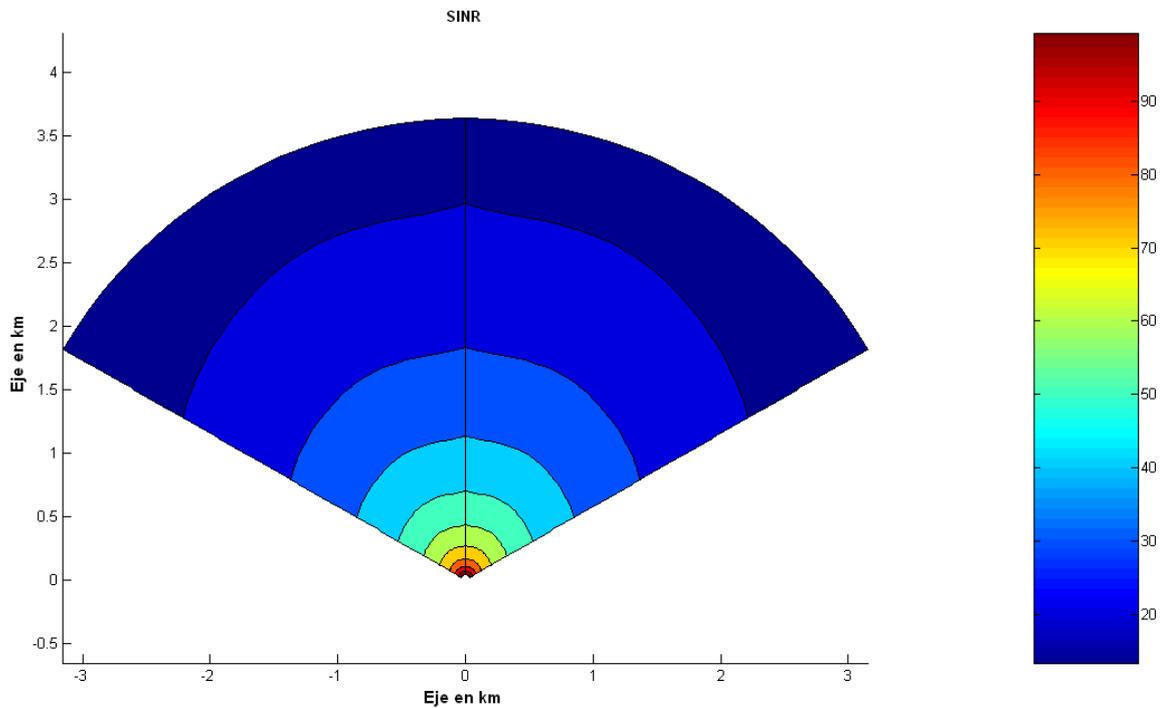


Figura 3-14: Ciudad Antena 120° Radio 4 km

Radio = 5 km mínimo SINR: 8.0147 dB media de bajada: 18.3281 Mbps

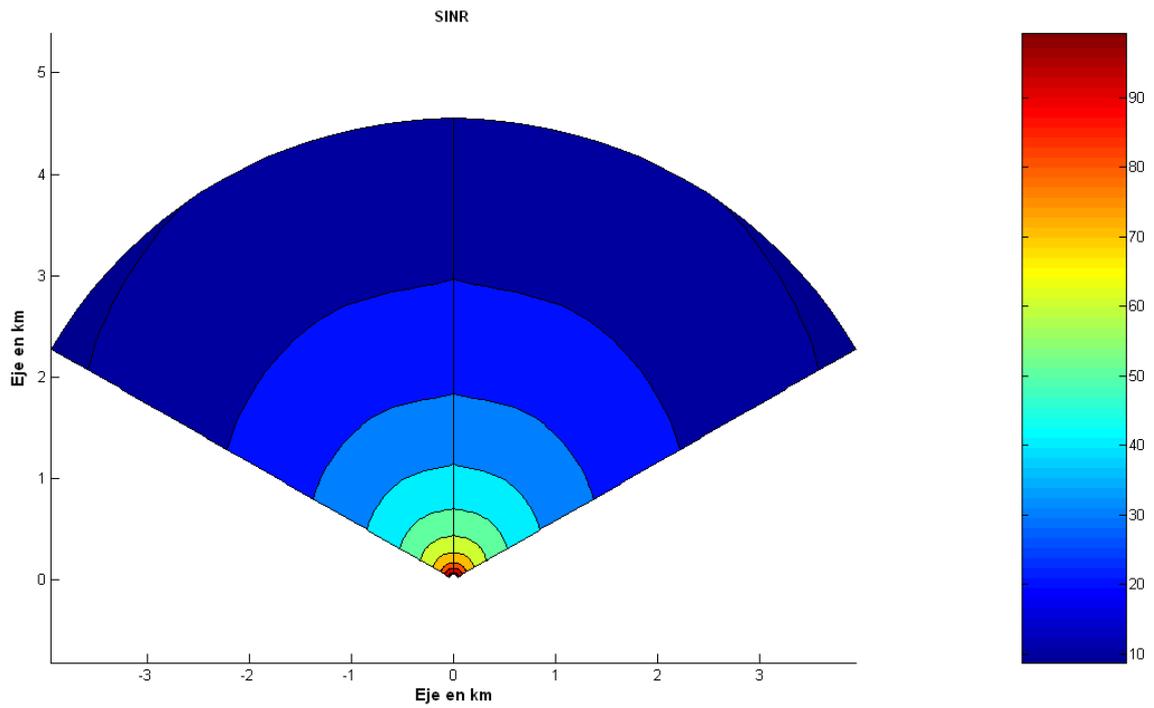


Figura 3-15: Ciudad Antena 120° Radio 5 km

Radio = 6 km mínimo SINR: 4.2180dB media de bajada: 14.6658 Mbps

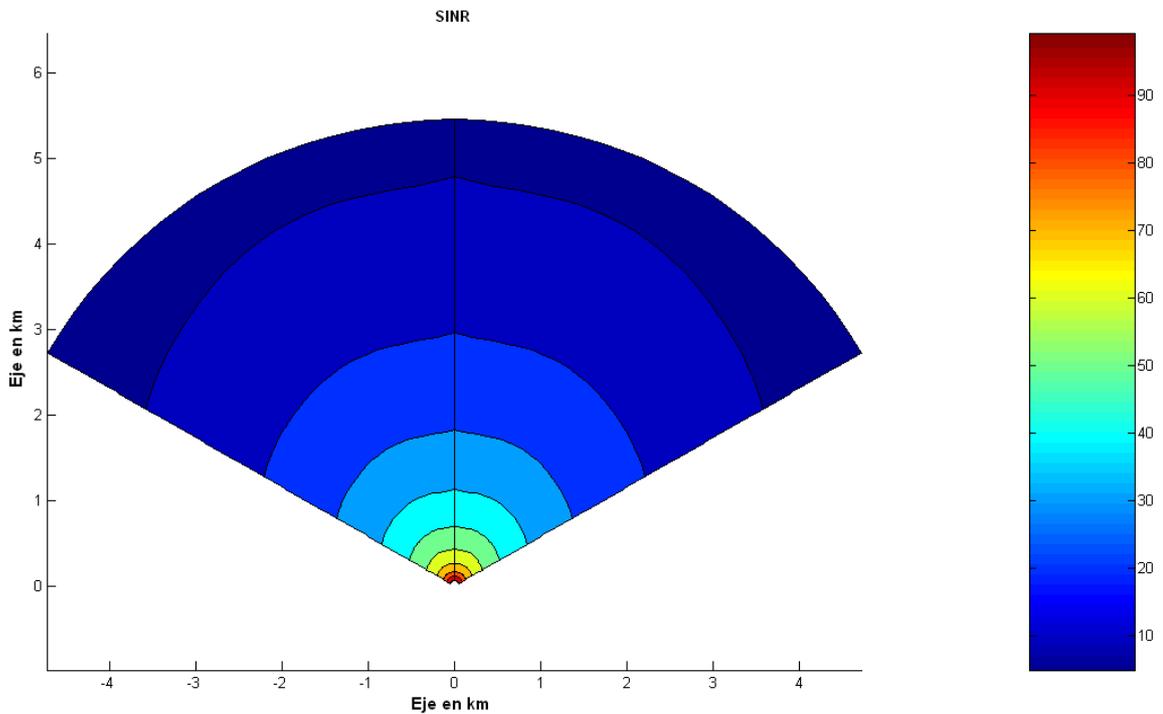


Figura 3-16: Ciudad Antena 120° Radio 6 km

Gráfico de las conexiones:

En la Figura 3 – 17 se muestra el número de conexiones que se pueden servir en función del radio de la celda.

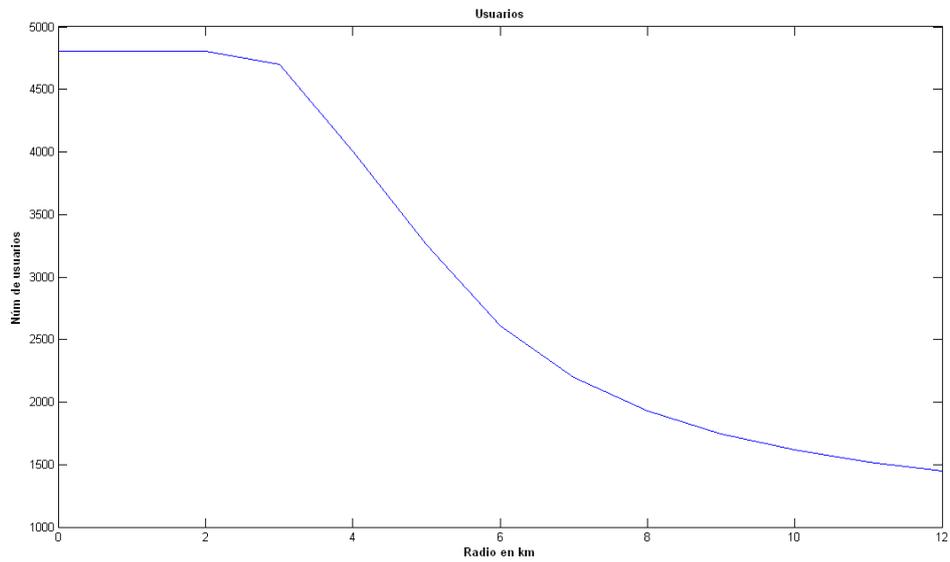


Figura 3-17: Conexiones 120° Ciudad

3.1.1.4 Resultados
Tabla 3-3: Resultados Ciudad

Radio (km)	90°	120°	60°
1	39.2019 dB	41.5303 dB	29.9343 dB
	26.9998 Mbps	26.9998 Mbps	26.9998 Mbps
	4802 conexiones	4802 conexiones	4802 conexiones
2	24.7675 dB	27.0959 dB	15.4999 dB
	26.9998 Mbps	26.9998 Mbps	26.7938 Mbps
	4802 conexiones	4802 conexiones	4766 conexiones
3	16.3240 dB	18.6523 dB	7.0563 dB
	26.1537 Mbps	26.4324 Mbps	24.4035 Mbps
	4652 conexiones	4701 conexiones	4340 conexiones
4	10.3332 dB	12.6615 dB	1.0655 dB
	21.8974 Mbps	22.5457 Mbps	Mbps
	3895 conexiones	4010 conexiones	3487 conexiones
5	5.6863 dB	8.0147 dB	
	17.6051 Mbps	18.3281 Mbps	
	3131 conexiones	3260 conexiones	
6		4.2180 dB	
		14.6658 Mbps	
		2608 conexiones	

3.1.2 Tipo B (Zona Rural)

3.1.2.1 Antena de 90°

Radio = 1 km mínimo SINR: 43.2299 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

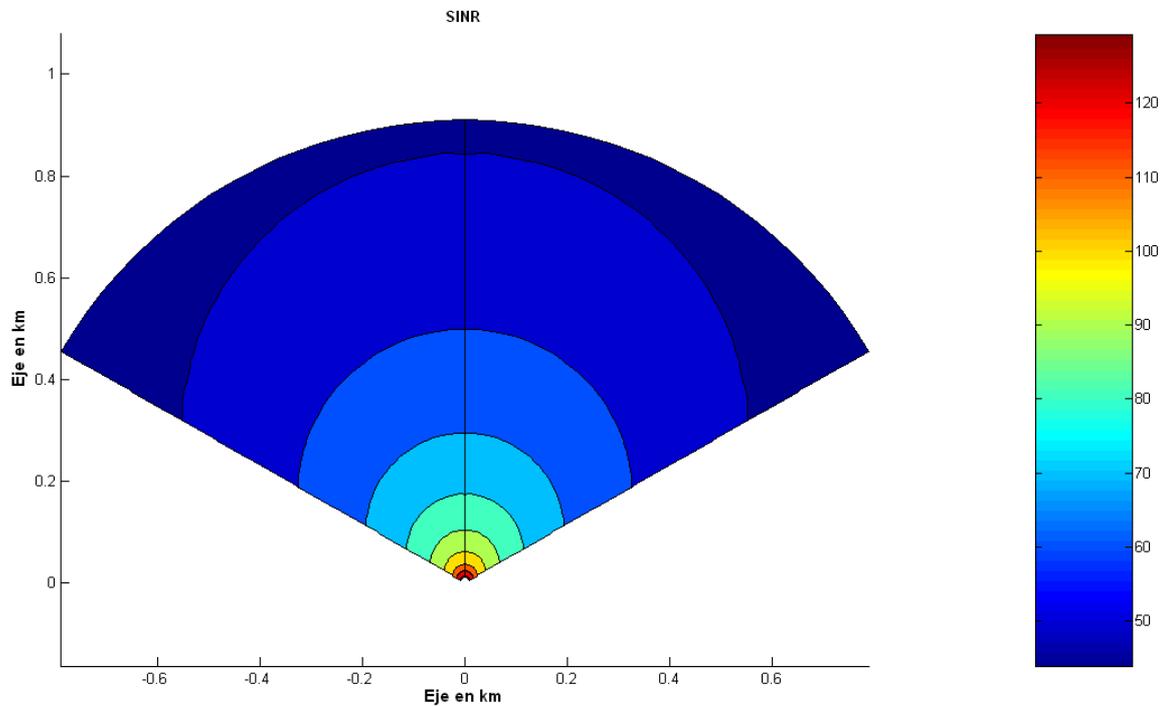


Figura 3-18: Zona Rural Antena 90° Radio 1 km

Radio = 2 km mínimo SINR: 30.0598 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

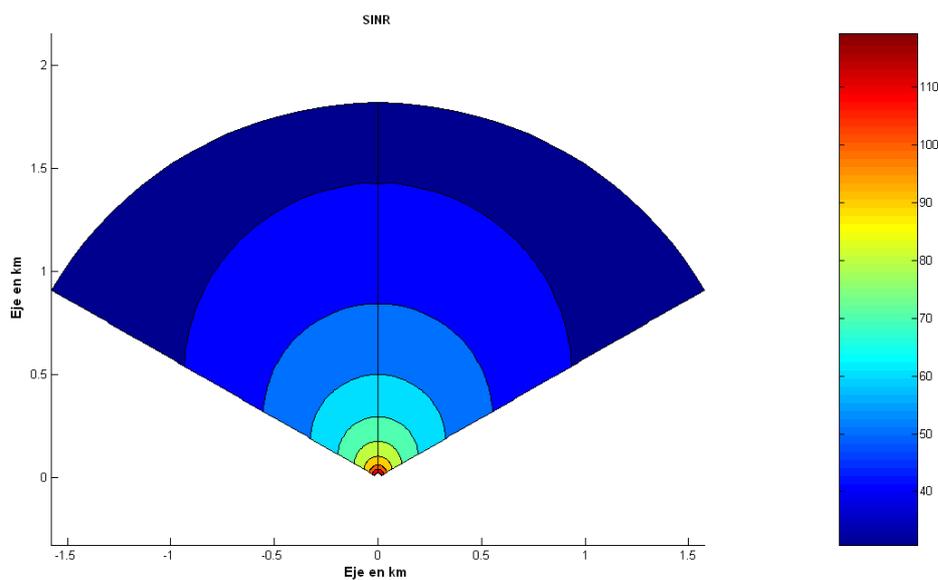


Figura 3-19: Zona Rural Antena 90° Radio 2 km

Radio = 3 km mínimo SINR: 22.3559 dB media de bajada: 26.9942 Mbps

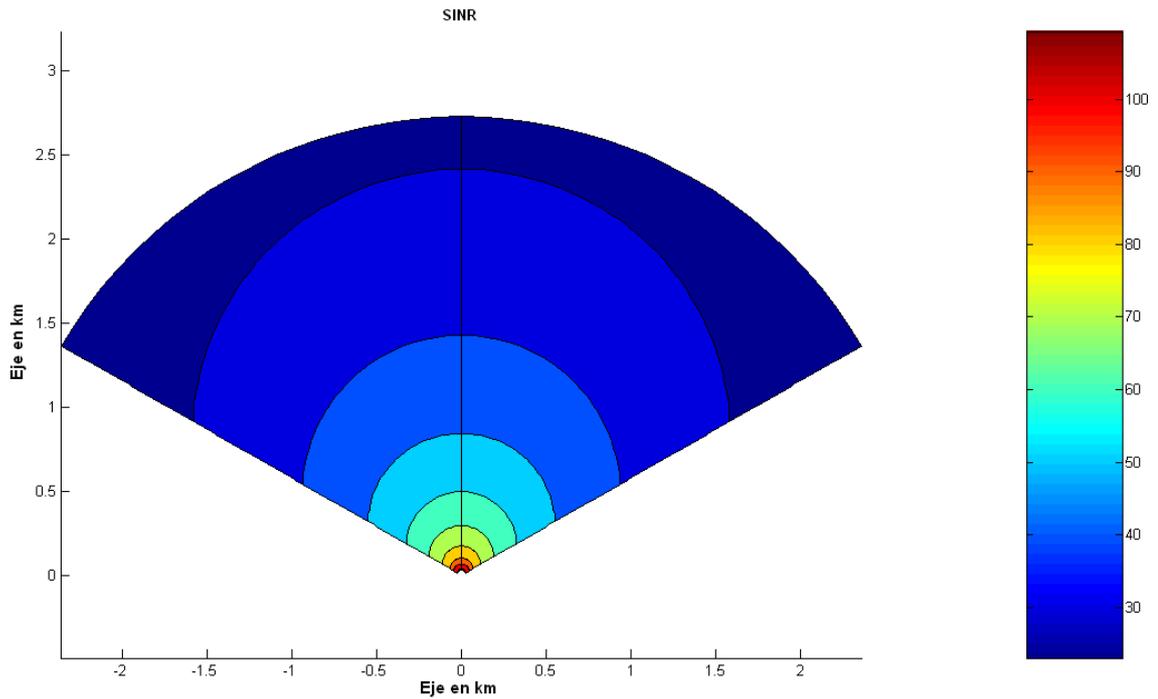


Figura 3-20: Zona Rural Antena 90° Radio 3 km

Radio = 4 km mínimo SINR: 16.8898 dB media de bajada: 26.2981 Mbps

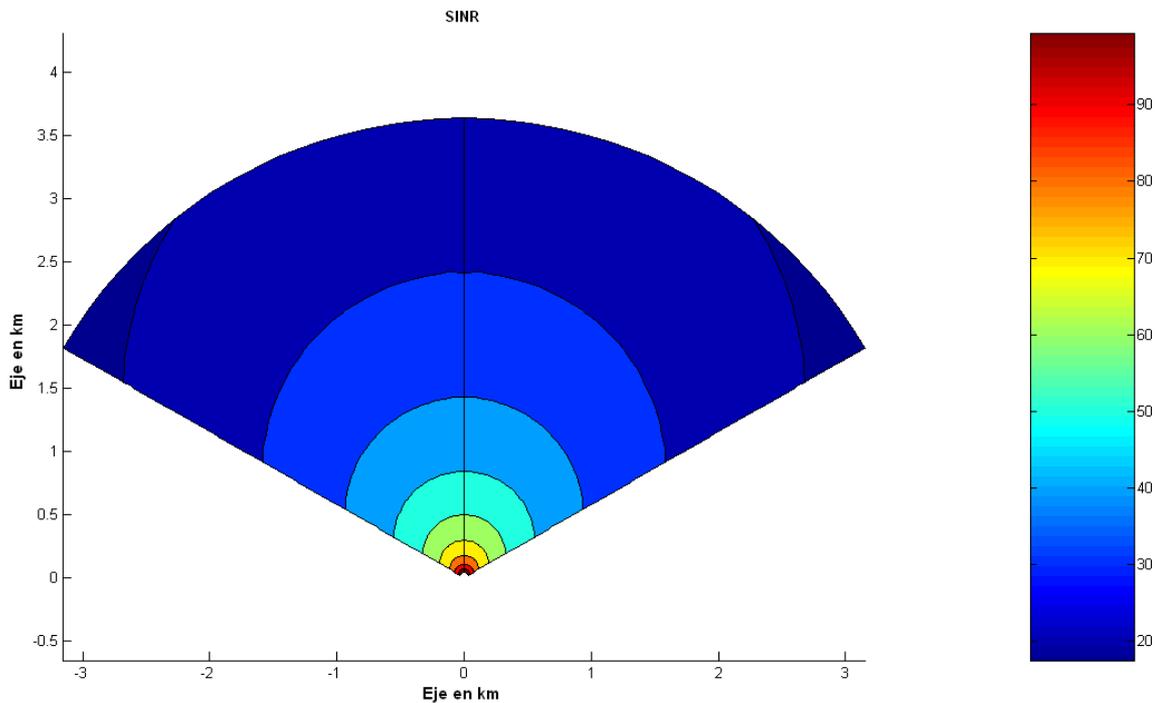


Figura 3-21: Zona Rural Antena 90° Radio 4 km

Radio = 5 km mínimo SINR: 12.6500 dB media de bajada: 23.8885 Mbps

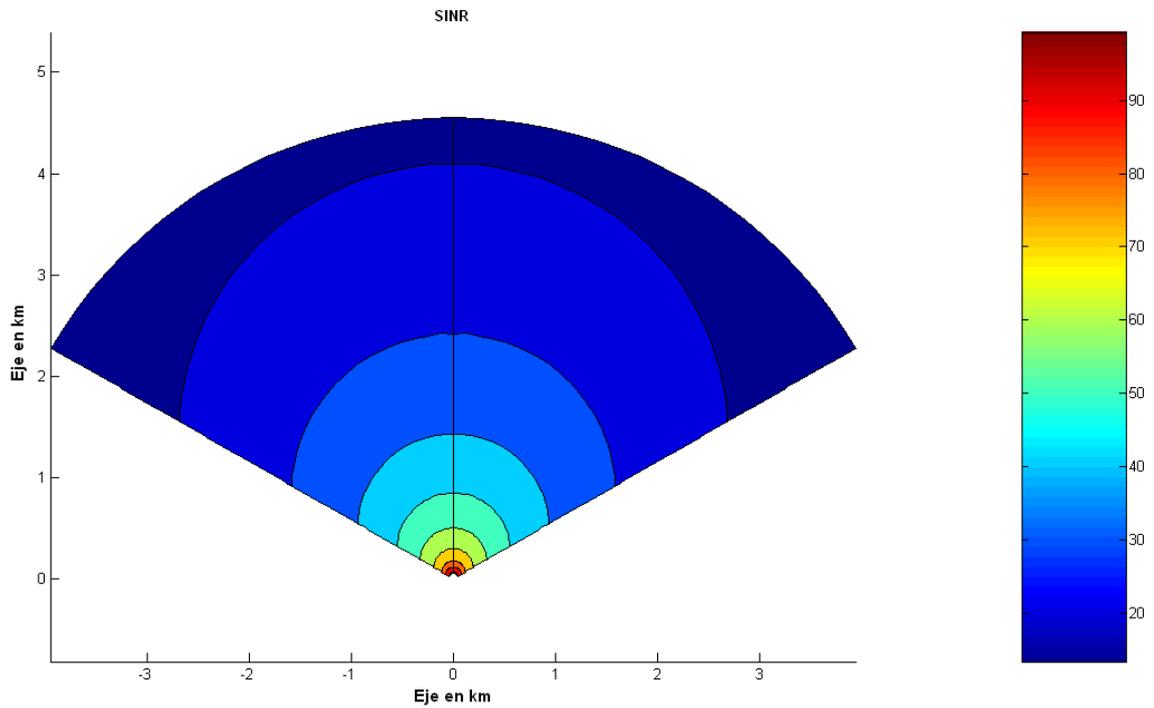


Figura 3-22: Zona Rural Antena 90° Radio 5 km

Radio = 6 km mínimo SINR: 9.1858 dB media de bajada: 20.4139 Mbps

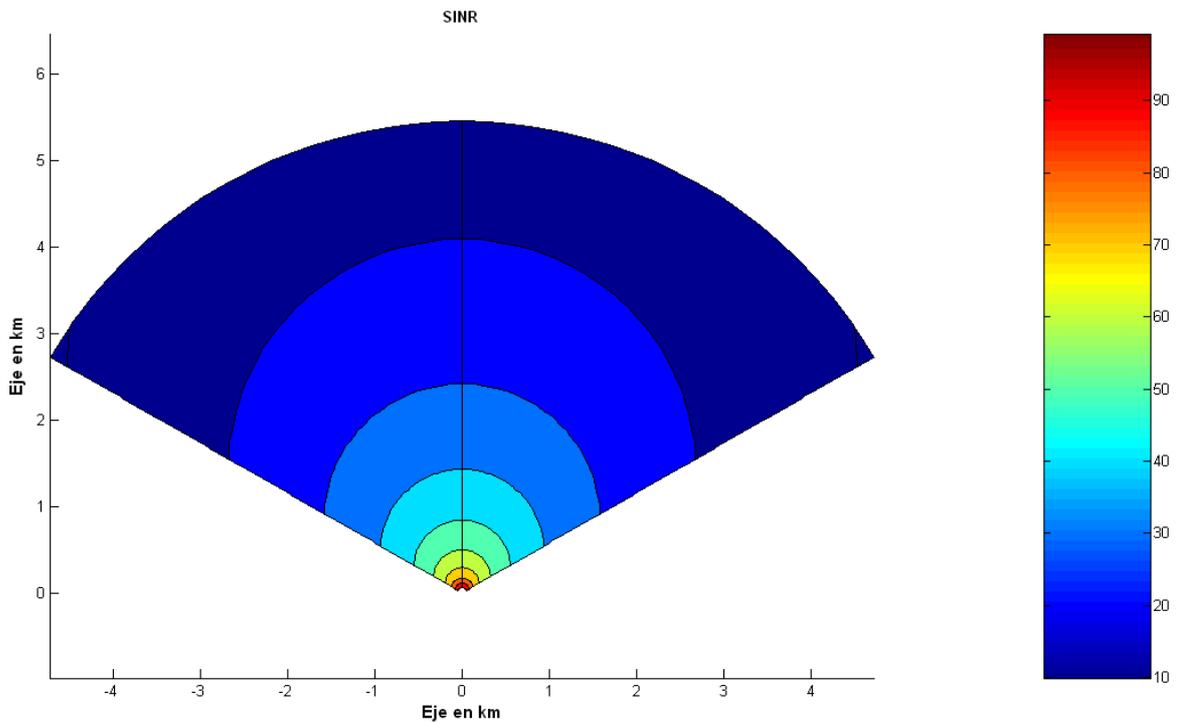


Figura 3-23: Zona Rural Antena 90° Radio 6 km

Radio = 7 km mínimo SINR: 6.2569 dB media de bajada: 17.6310 Mbps

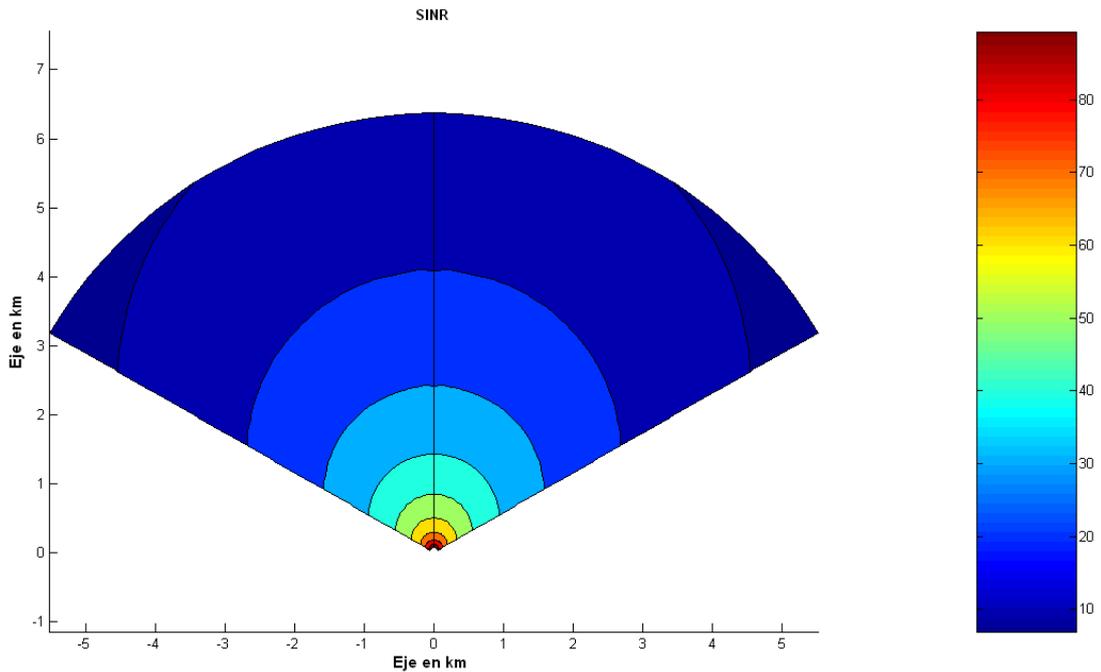


Figura 3-24: Zona Rural Antena 90° Radio 7 km

Gráfico de las conexiones:

En la Figura 3 – 25 se muestra el número de conexiones que se pueden servir en función del radio de la celda.

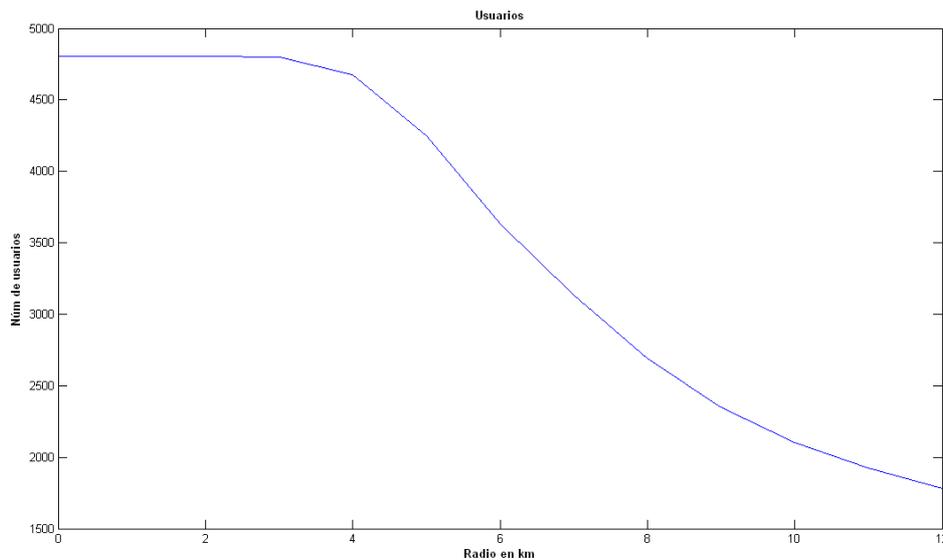


Figura 3-25: Conexiones 90° Zona rural

3.1.2.2 Antena de 60°

Radio = 1 km mínimo SINR: 33.9623 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

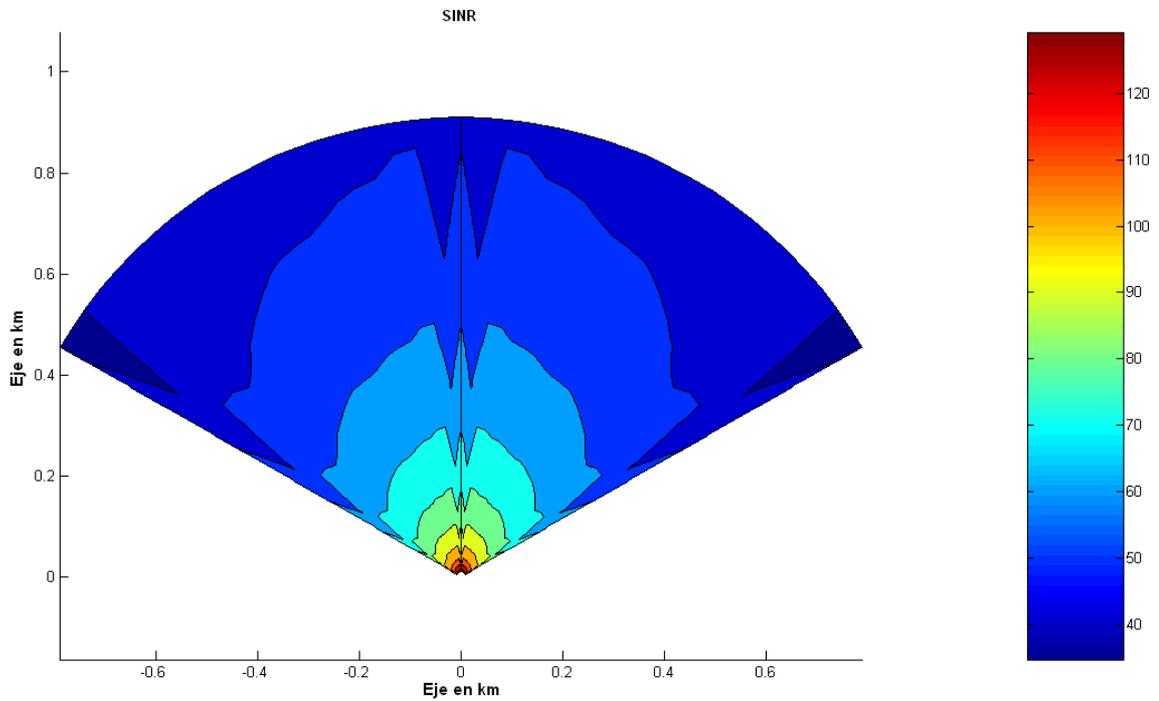


Figura 3-26: Zona Rural Antena 60° Radio 1 km

Radio = 2 km mínimo SINR: 20.7922 dB media de bajada: 26.9729 Mbps

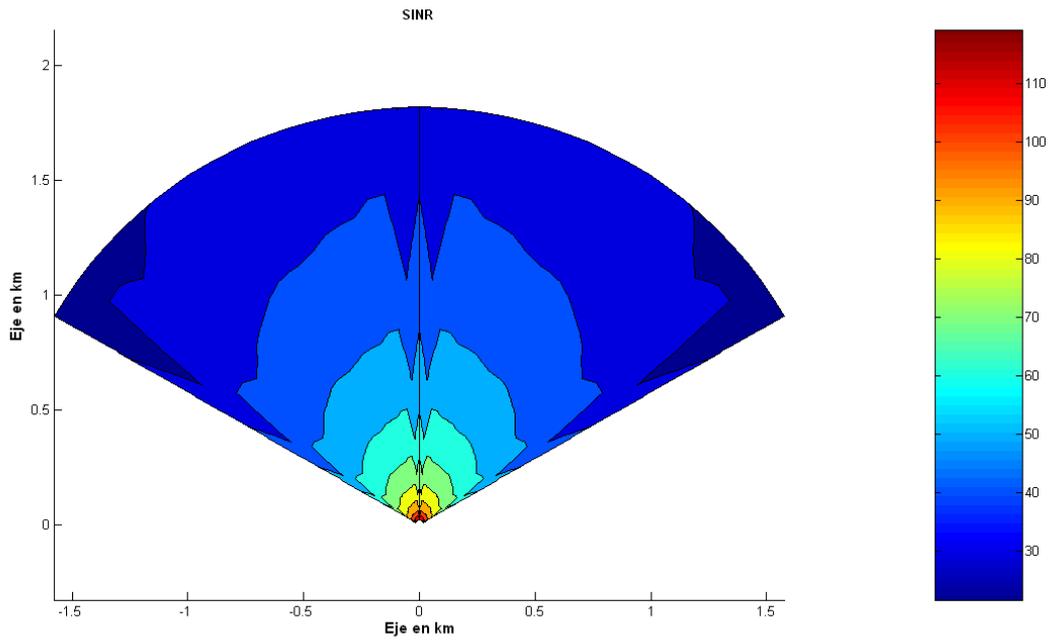


Figura 3-27: Zona Rural Antena 60° Radio 2 km

Radio = 3 km mínimo SINR: 13.0882 dB media de bajada: 26.4786 Mbps

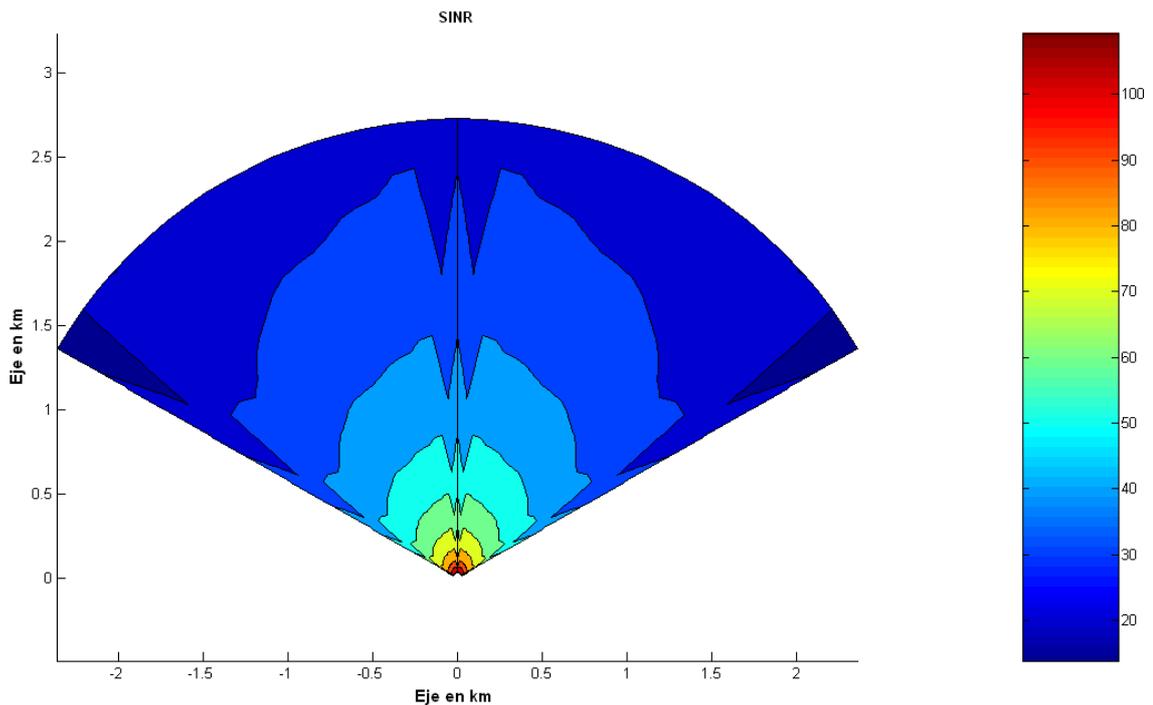


Figura 3-28: Zona Rural Antena 60° Radio 3 km

Radio = 4 km mínimo SINR: 7.6222 dB media de bajada: 24.5741 Mbps

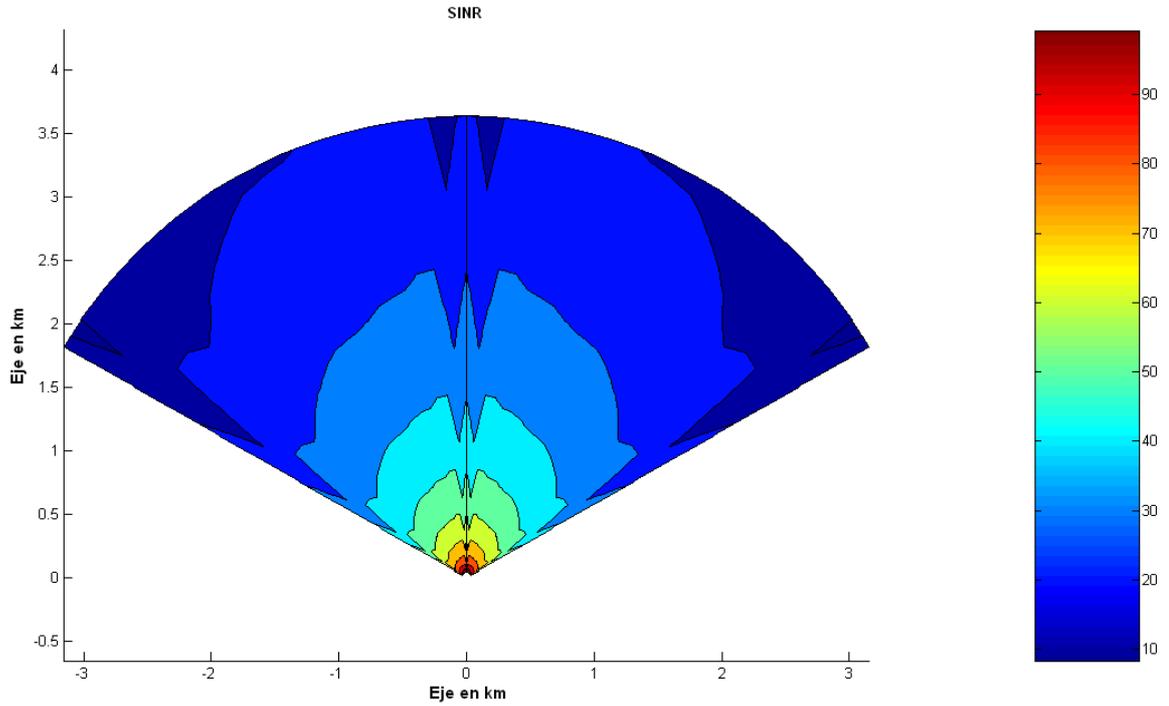


Figura 3-29: Zona Rural Antena 60° Radio 4 km

Gráfico de las conexiones:

En la Figura 3 – 30 se muestra el número de conexiones que se pueden servir en función del radio de la celda.

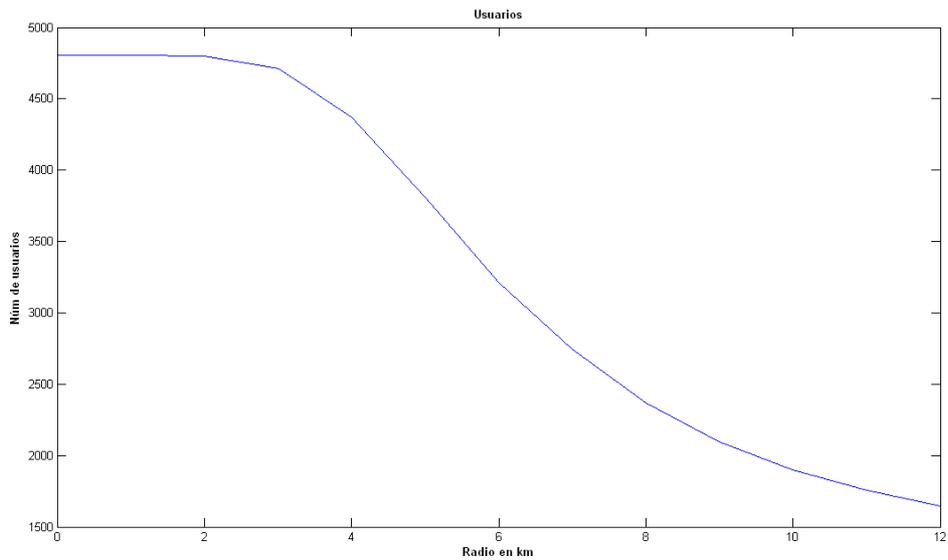


Figura 3-30: Conexiones 60° Zona Rural

3.1.2.3 Antena de 120°

Radio = 1 km mínimo SINR: 45.5583 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

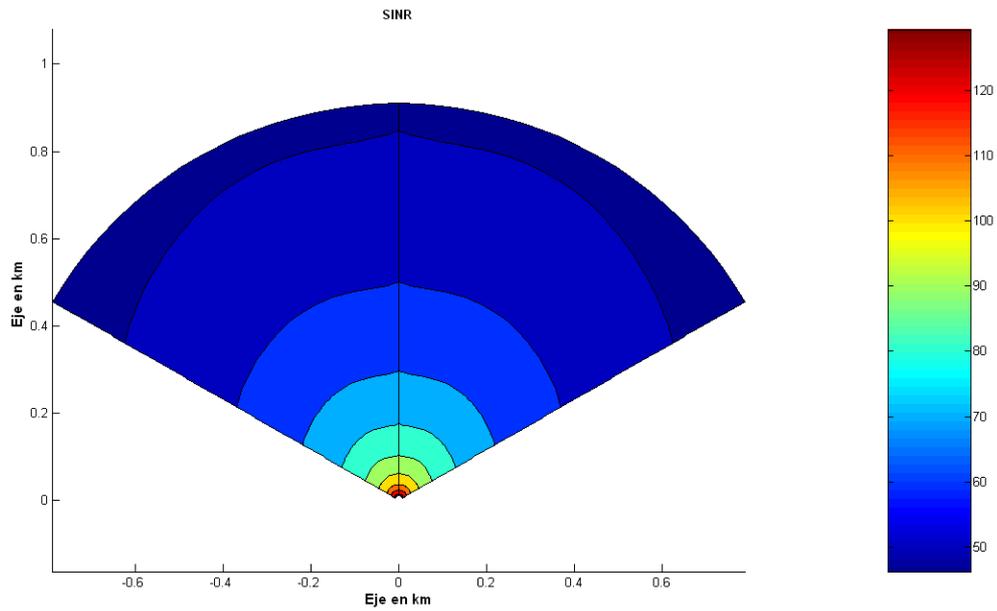


Figura 3-31: Zona Rural Antena 120° Radio 1 km

Radio = 2 km mínimo SINR: 32.3882 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

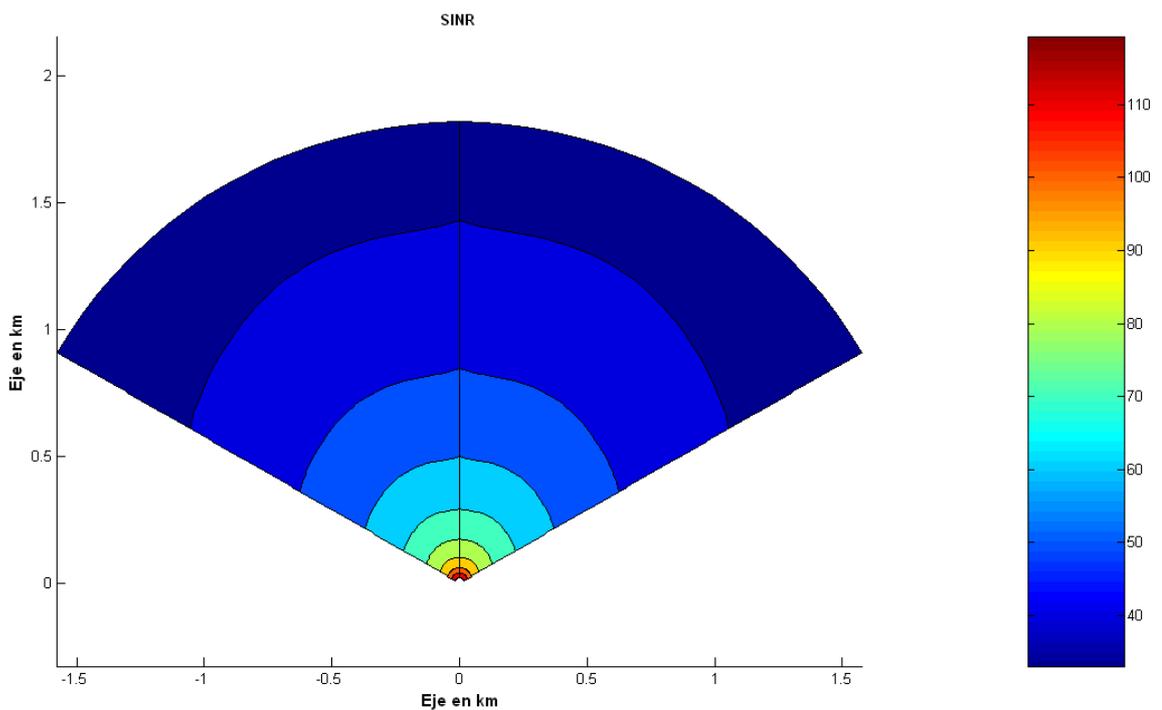


Figura 3-32: Zona Rural Antena 120° Radio 2 km

Radio = 3 km mínimo SINR: 24.6842 dB media de bajada: 26.9998 Mbps

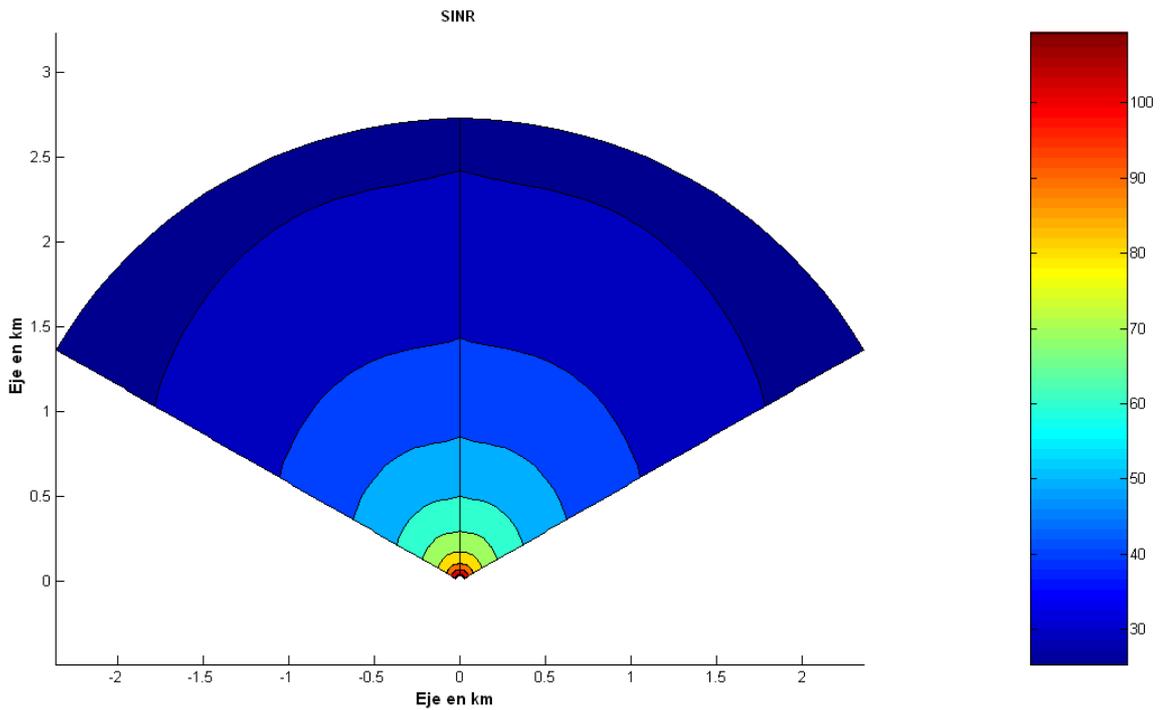


Figura 3-33: Zona Rural Antena 120° Radio 3 km

Radio = 4 km mínimo SINR: 19.2182 dB media de bajada: 26.5309 Mbps

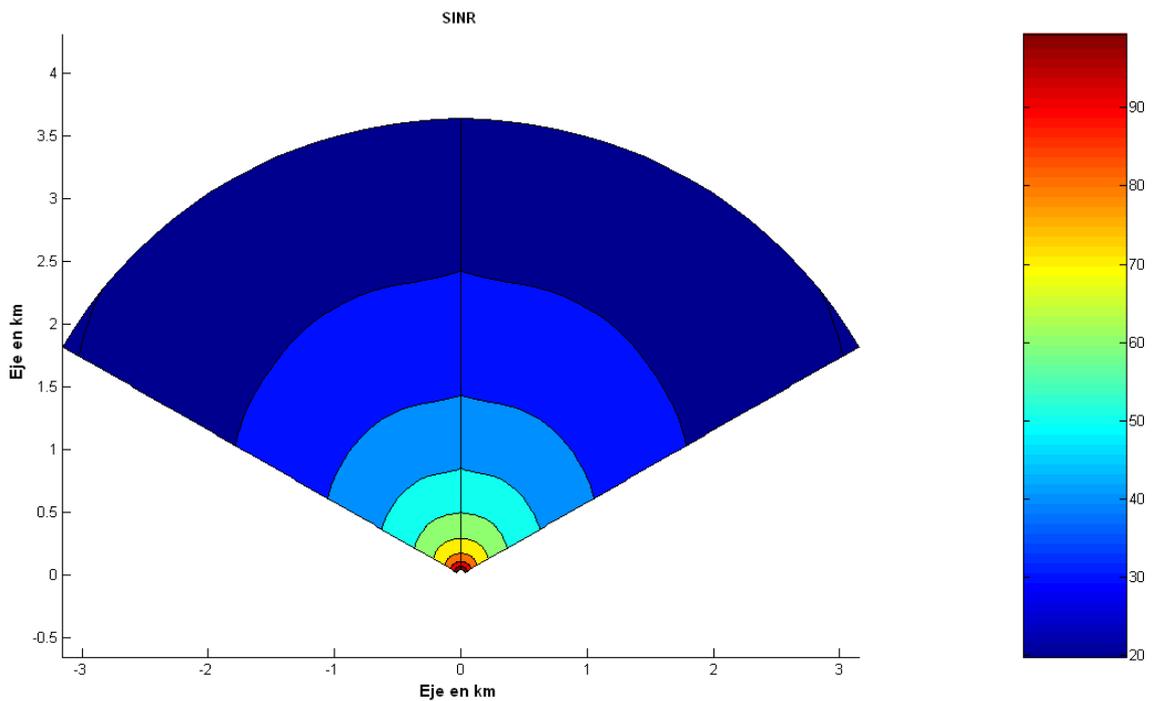


Figura 3-34: Zona Rural Antena 120° Radio 4 km

Radio = 5 km mínimo SINR: 14.9783 dB media de bajada: 24.6720 Mbps

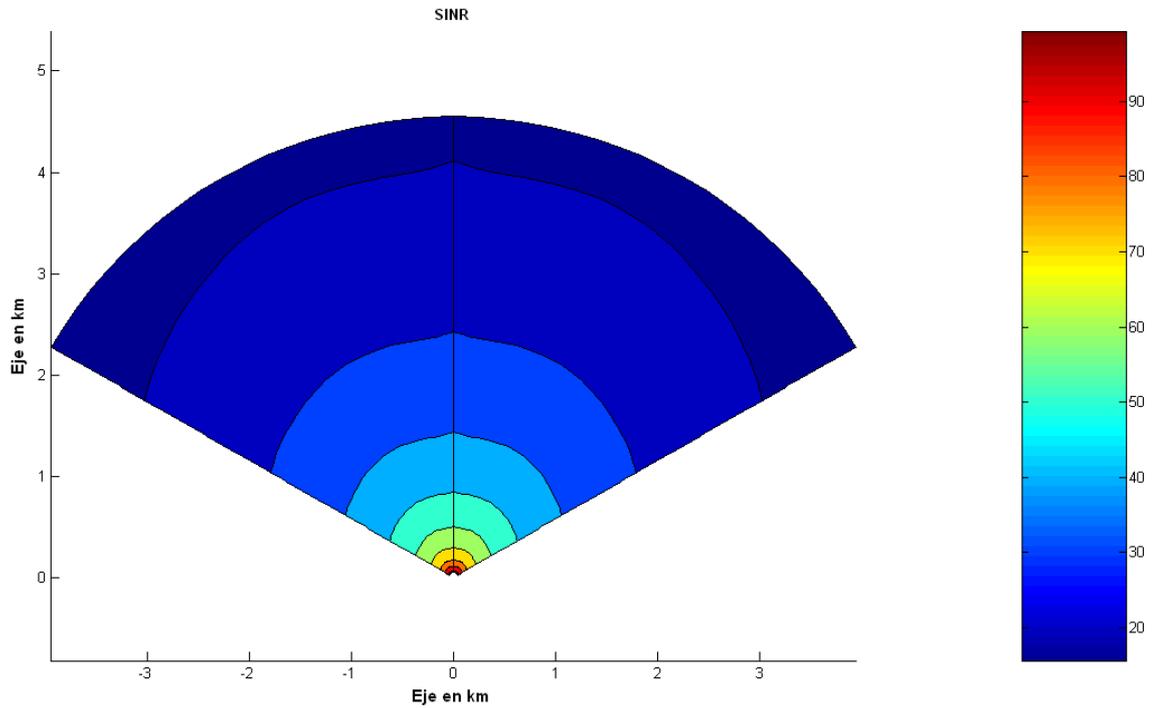


Figura 3-35: Zona Rural Antena 120° Radio 5 km

Radio = 6 km mínimo SINR: 11.5142 dB media de bajada: 21.0837 Mbps

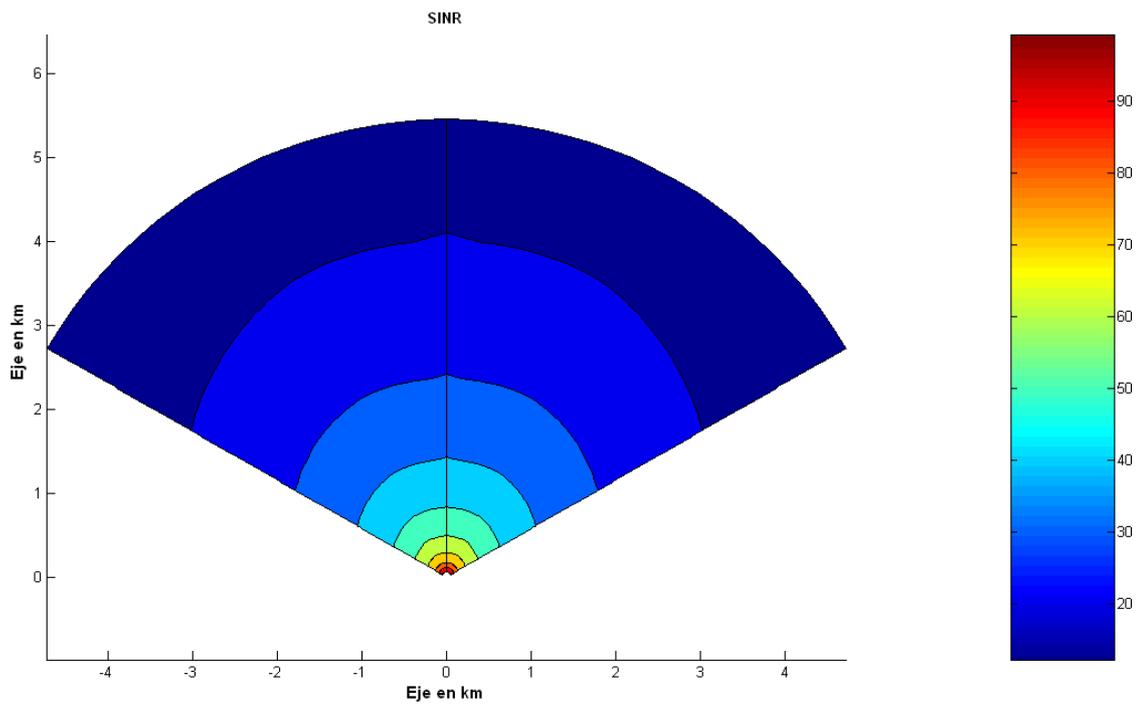


Figura 3-36: Zona Rural Antena 120° Radio 6 km

Radio = 7 km mínimo SINR: 8.5852 dB media de bajada: 18.3703 Mbps

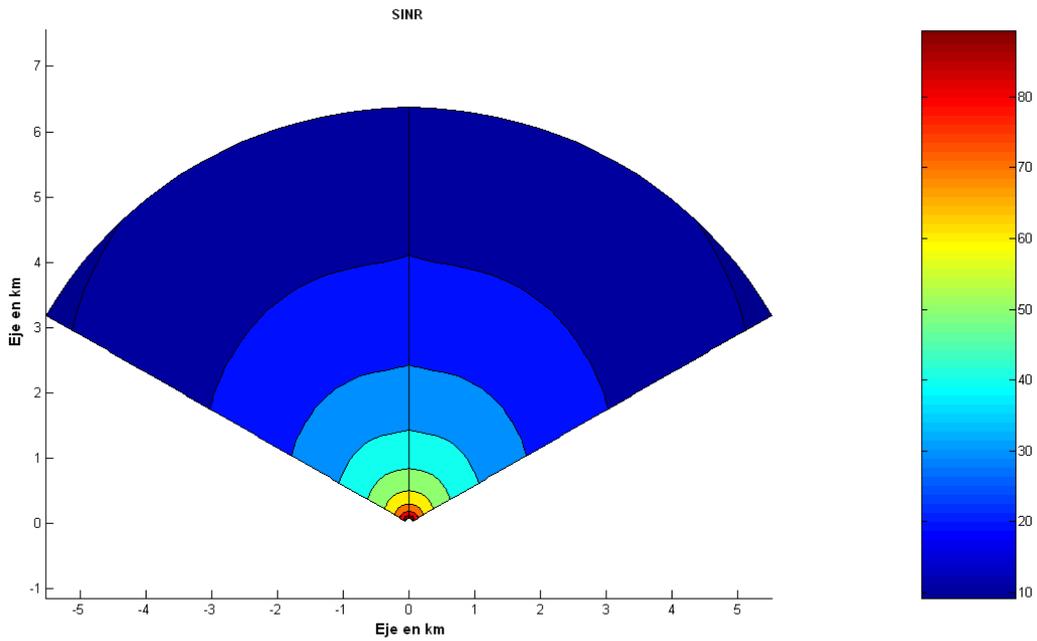


Figura 3-37: Zona Rural Antena 120° Radio 7 km

Radio = 8 km mínimo SINR: 6.0481 dB media de bajada: 15.7857 Mbps

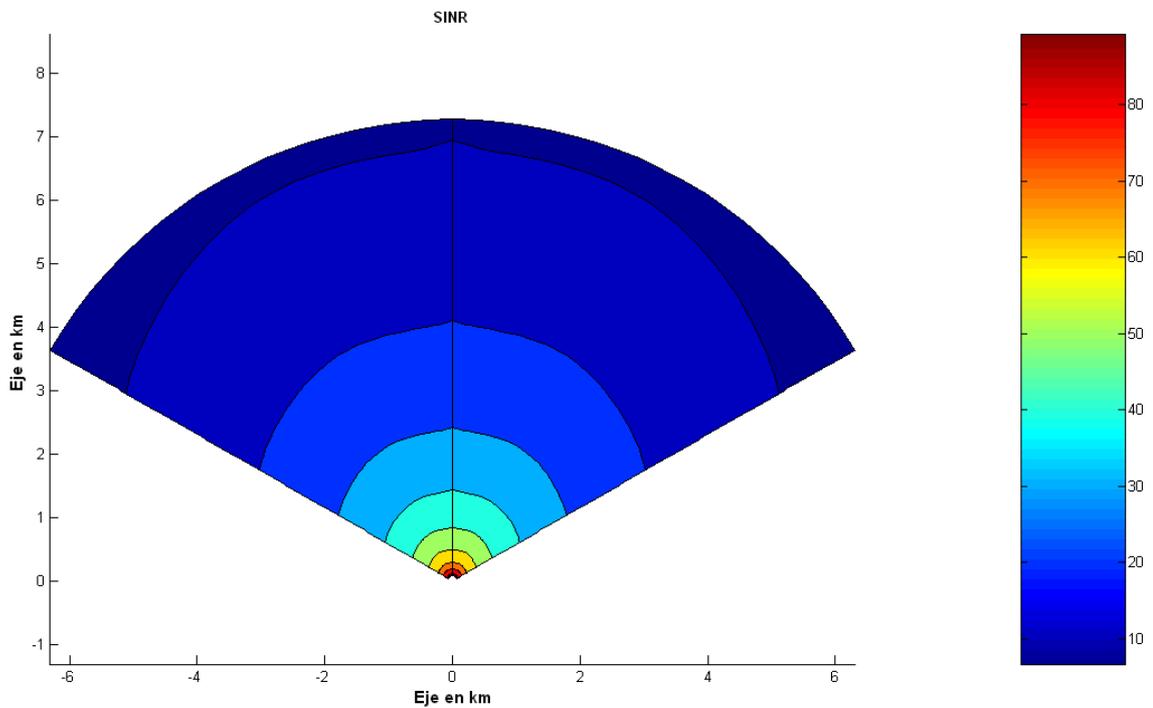


Figura 3-38: Zona Rural Antena 120° Radio 8 km

Gráfico de las conexiones:

En la Figura 3 – 39 se muestra el número de conexiones que se pueden servir en función del radio de la celda.

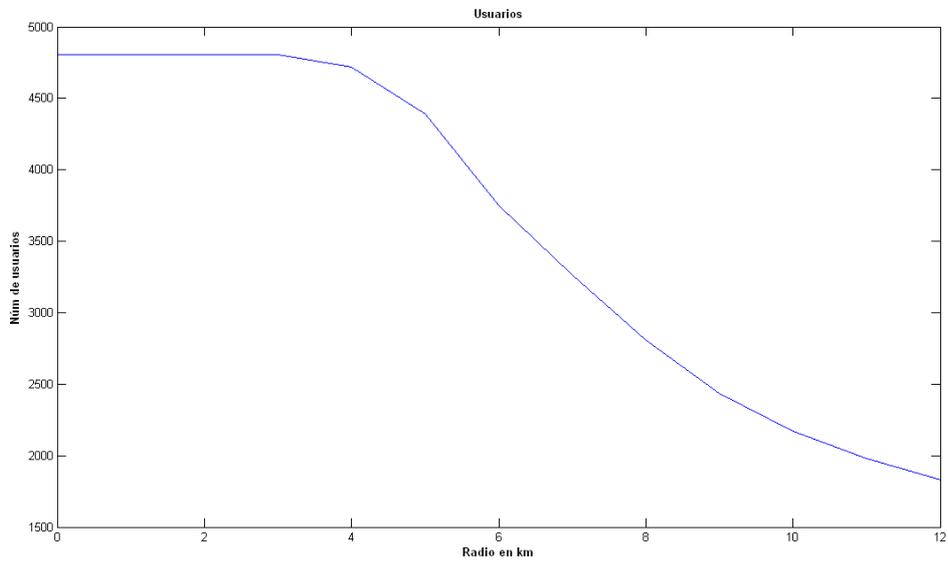


Figura 3-39: Conexiones 120° Zona rural

3.1.2.4 Resultados
Tabla 3-4: Resultados Zona Rural

Radio (km)	90°	120°	60°
1	43.2299 dB	45.5583 dB	33.9623 dB
	26.9998 Mbps	26.9998 Mbps	26.9998 Mbps
	4802 conexiones	4802 conexiones	4802 conexiones
2	30.0598 dB	32.3882 dB	20.7922 dB
	26.9998 Mbps	26.9998 Mbps	26.9729 Mbps
	4802 conexiones	4802 conexiones	4798 conexiones
3	22.3559 dB	24.6842 dB	13.0882 dB
	26.9942 Mbps	26.9998 Mbps	26.4786 Mbps
	4801 conexiones	4802 conexiones	4710 conexiones
4	16.8898 dB	19.2182 dB	7.6222 dB
	26.2981 Mbps	26.5309 Mbps	24.5741 Mbps
	4678 conexiones	4719 conexiones	4371 conexiones
5	12.6500 dB	14.9783 dB	
	23.8885 Mbps	24.6720 Mbps	
	4249 conexiones	4388 conexiones	
6	9.1858 dB	11.5142 dB	
	20.4139 Mbps	21.0837 Mbps	
	3631 conexiones	3750 conexiones	
7	6.2569 dB	8.5852 dB	
	17.6310Mbps	18.3703 Mbps	
	3136 conexiones	3267 conexiones	
8		6.0481 dB	

		15.7857 Mbps	
		2808 conexiones	

Zona de puerto

En este caso no tenemos en cuenta las interferencias cocanal, ya que entendemos que de la costa en adelante no vamos a tener ninguna estación interferente, además el modelo de propagación cambia, ya que los parámetros del cálculo del SINR son diferentes. Para este caso la antena receptora ubicada en el barco cambia, tanto en altura como en ganancia, ya que suponemos que la antena está anclada al mástil de un barco, esta red está especialmente diseñada para que los barcos tengan comunicación con el puerto.

En la Figura 3-40 se muestra una fotografía con las antenas en los barcos.



Figura 3-40: Antena de Barco

3.1.3 Tipo C (Playa)

En este caso el LOS es de 35 km.

3.1.3.1 Antena de 120°

Barco Antena de 8 dB

Radio LOS mínimo SINR: -40.8883 dB media de bajada: 26.4096 Mbps

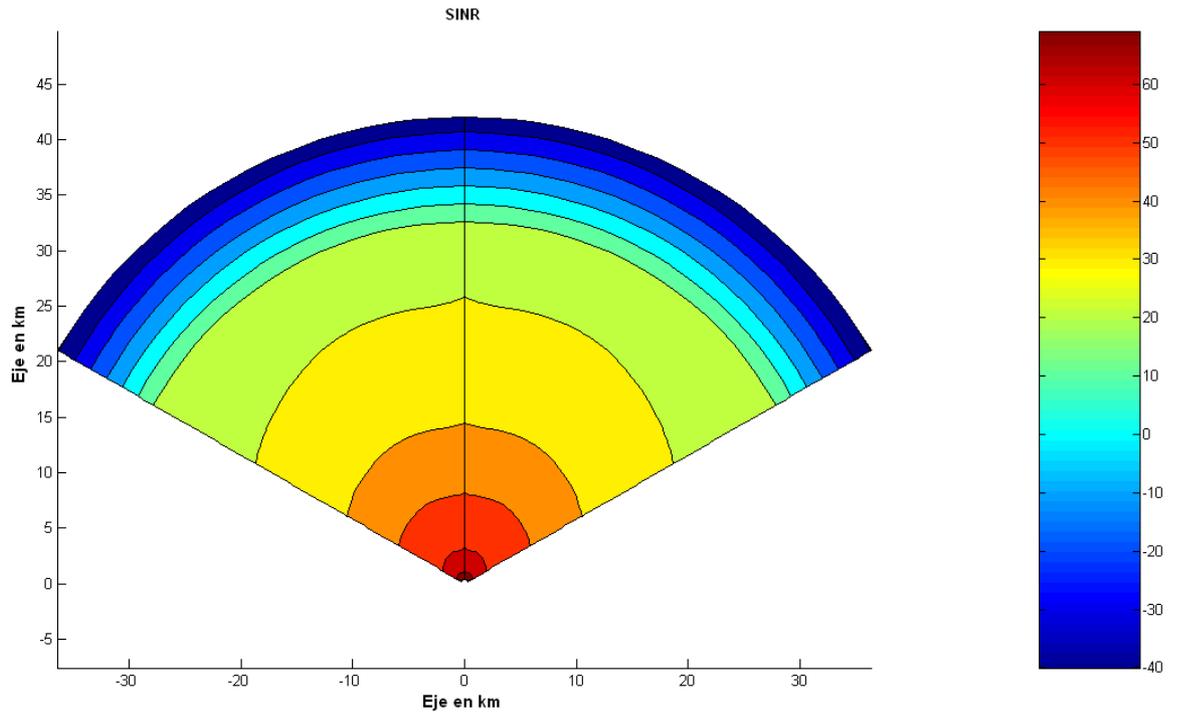


Figura 3-41: Puerto Antena 120° Rx 8 dB

Barco Antena de 10 dB

Radio LOS mínimo SINR: -38.8883 dB media de bajada: 26.4096 Mbps

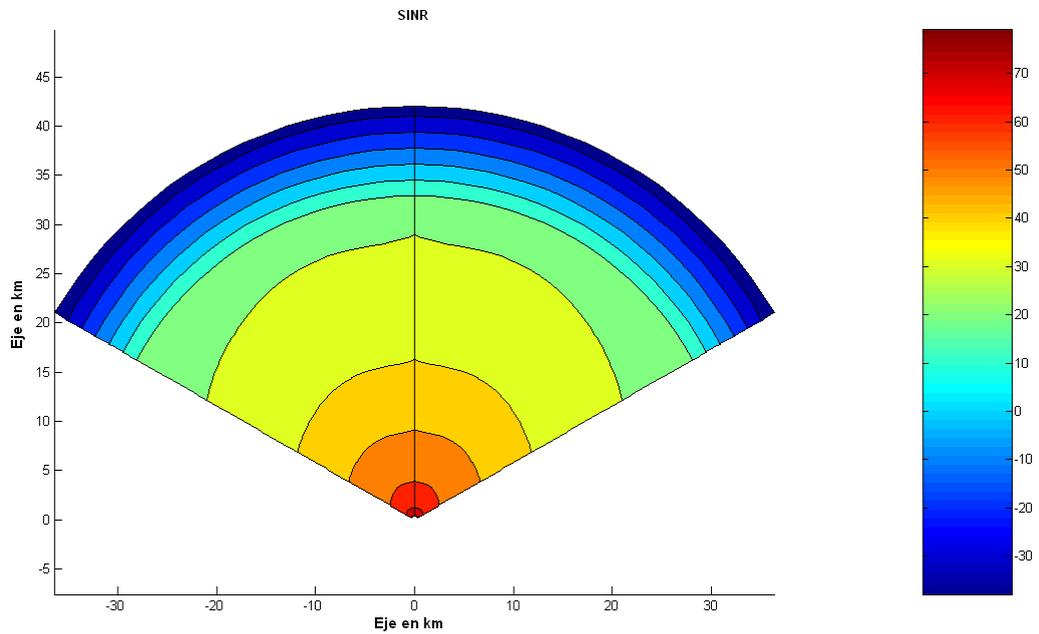


Figura 3-42: Puerto Antena 120° Rx 10 dB

Barco Antena de 12 dB

Radio LOS mínimo SINR: -36.8883 dB media de bajada: 26.4096 Mbps

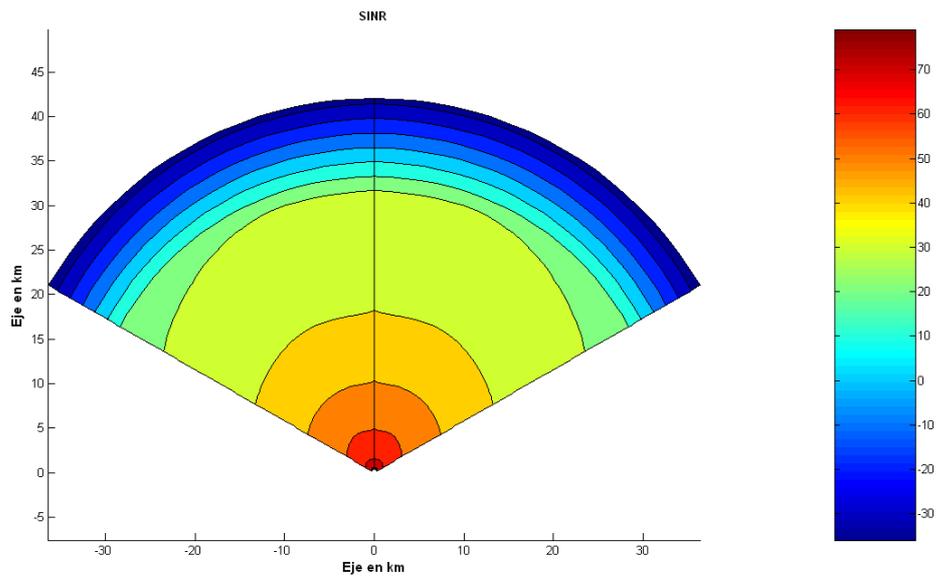


Figura 3-43: Puerto Antena 120° Rx 12 dB

3.1.3.2 Resultados

Tabla 3-5: Resultados Zona Costera con antena de 120°

Antena de 120°	Barco 8 dB	Barco 10 dB	Barco 12 dB
LOS	-40.8883 dB	-38.8883 dB	-36.8883 dB
	26.4096 Mbps	26.4096 Mbps	26.4096 Mbps
	4697 conexiones	4697 conexiones	4697 conexiones

3.1.3.3 Antena de 90°

Barco Antena de 8 dB

Radio LOS mínimo SINR: -43.2166 dB media de bajada: 26.3561 Mbps

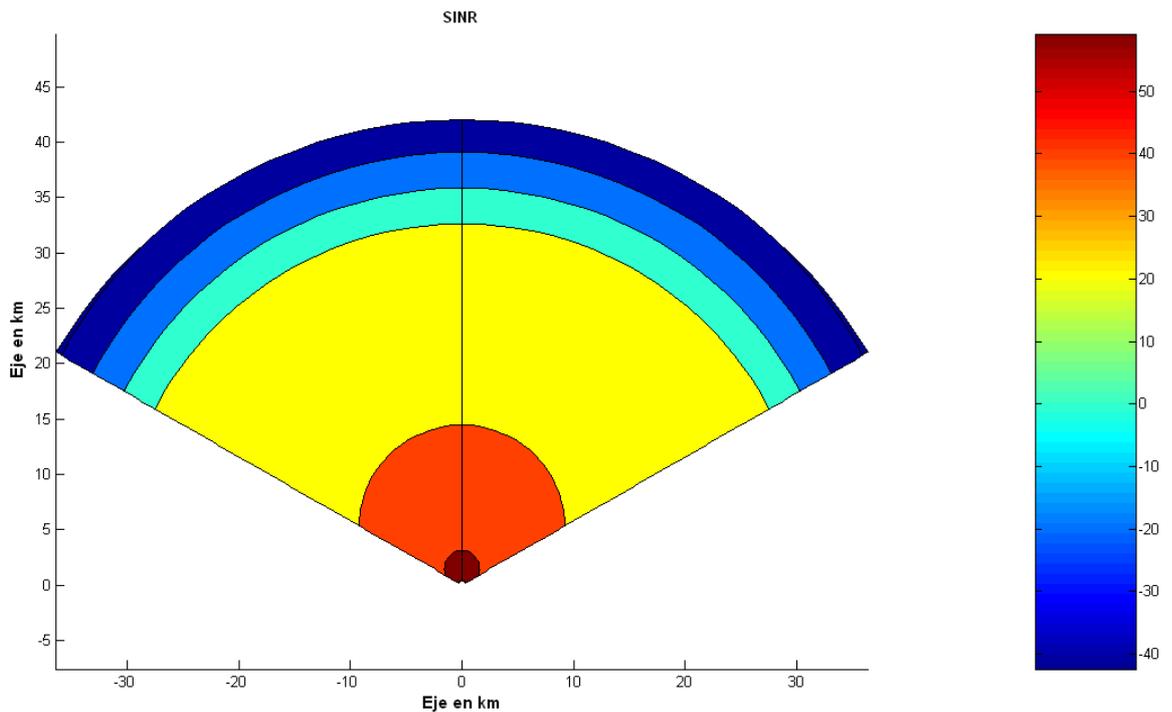


Figura 3-44: Puerto Antena 90° Rx 8 dB

Barco Antena de 10 dB

Radio LOS mínimo SINR: -41.2166 dB media de bajada: 26.4096 Mbps

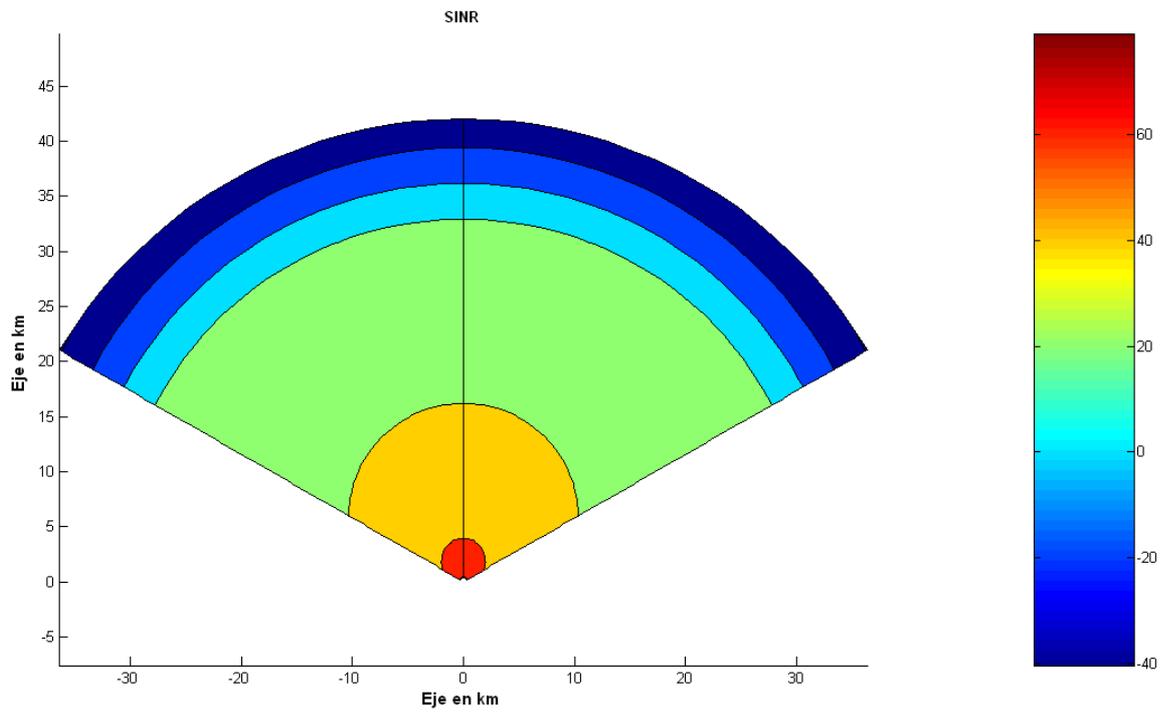


Figura 3-45: Puerto Antena 90° Rx 10 dB

Barco Antena de 12 dB

Radio LOS mínimo SINR: -39.2166 dB media de bajada: 26.4096 Mbps

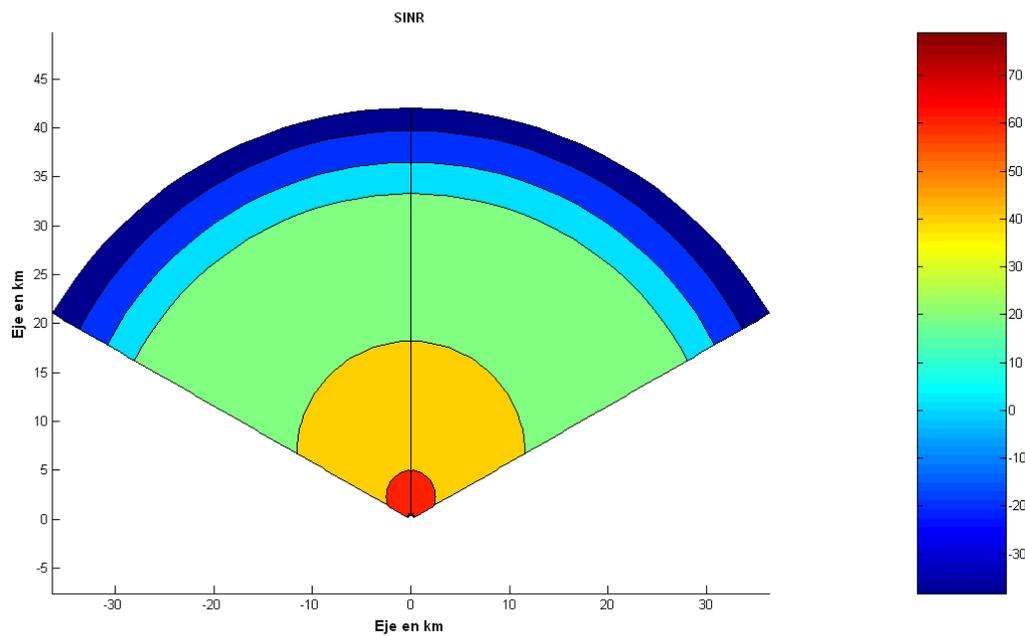


Figura 3-46: Puerto Antena 90° Rx 12 dB

3.1.3.4 Resultados

Tabla 3-6: Resultados Zona Costera con antena de 90°

Antena de 90°	Barco 8 dB	Barco 10 dB	Barco 12 dB
LOS	-43.2166 dB	-41.2166 dB	-39.2166 dB
	26.3561 Mbps	26.4096 Mbps	26.4096 Mbps
	4688 conexiones	4697 conexiones	4697 conexiones

3.1.3.5 Antena de 60°

Barco Antena de 8 dB

Radio LOS mínimo SINR: -52.4843 dB media de bajada: 25.6425 Mbps

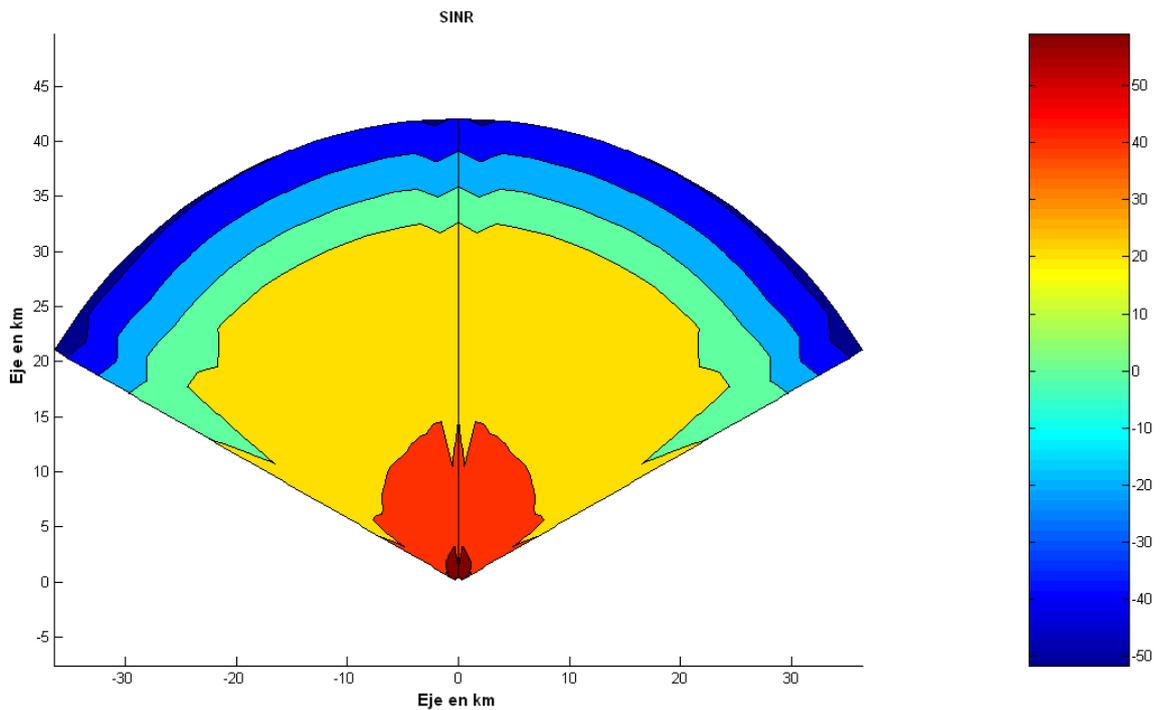


Figura 3-47: Puerto Antena 60° Rx 8 dB

Barco Antena de 10 dB

Radio LOS mínimo SINR: -50.4843 dB media de bajada: 25.9801 Mbps

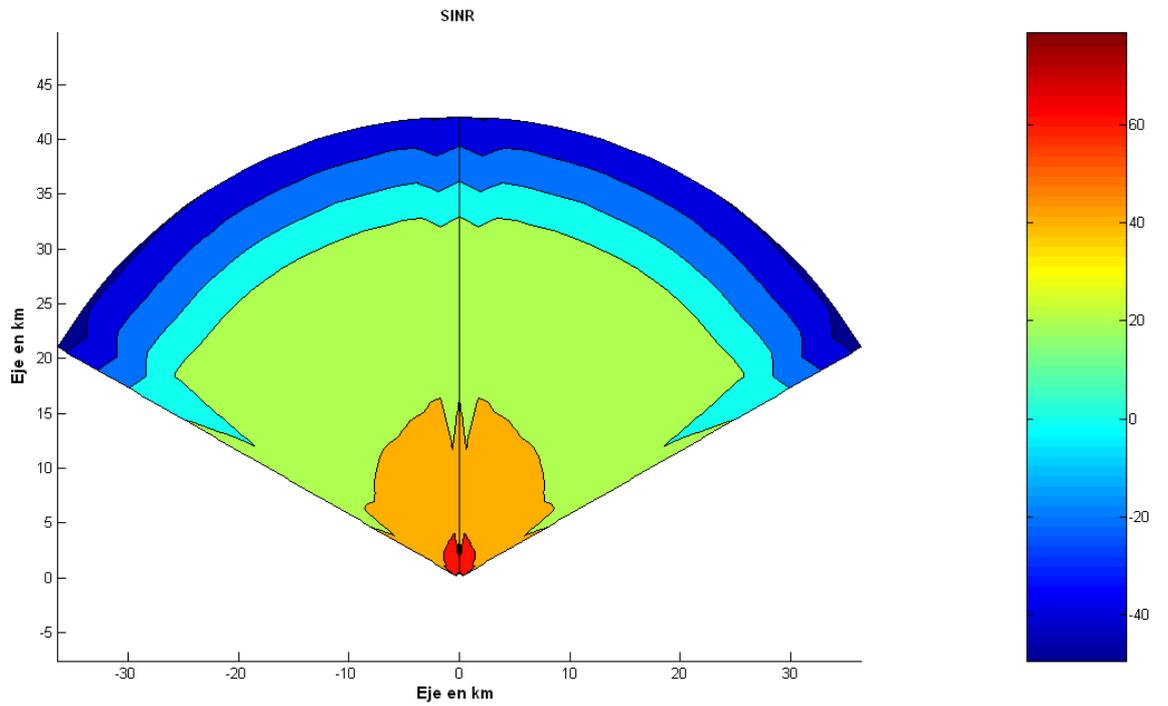


Figura 3-48: Puerto Antena 60° Rx 10 dB

Barco Antena de 12 dB

Radio LOS mínimo SINR: -48.4843 dB media de bajada: 26.2104 Mbps

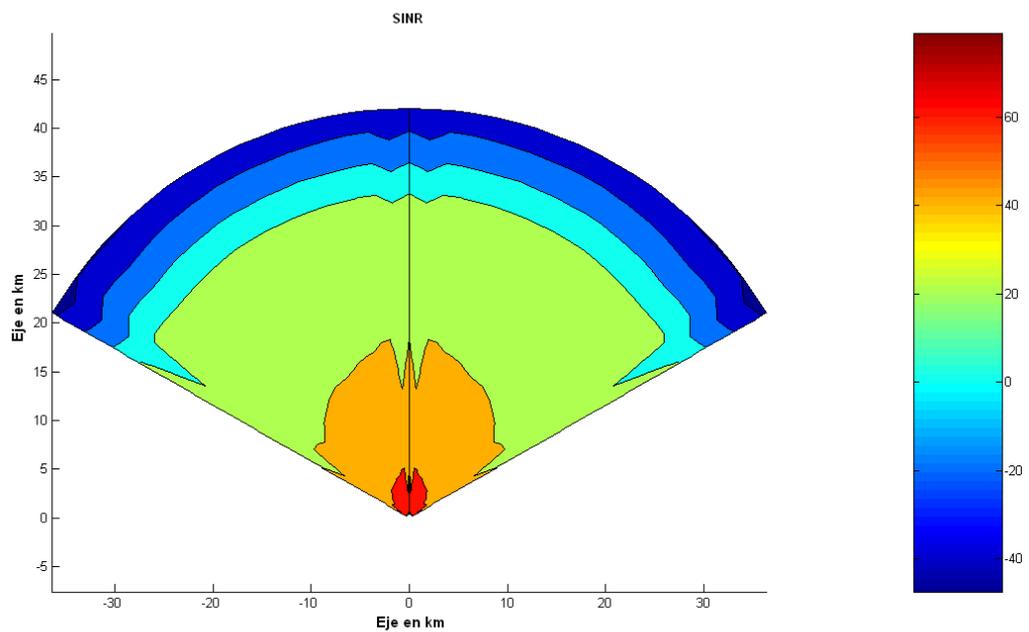


Figura 3-49: Puerto Antena 60° Rx 12 dB

3.1.3.6 Resultados

Tabla 3-7: Resultados Zona Costera con antena de 60°

Antena de 60°	Barco 8 dB	Barco 10 dB	Barco 12 dB
LOS	-52.4843 dB	-50.4843 dB	-48.4843 dB
	25.6425 Mbps	25.9801 Mbps	26.2104 Mbps
	4561 conexiones	4621 conexiones	4662 conexiones

LOS, en nuestro caso es de 35 Km, ésta se calcula con la siguiente fórmula:

$$LOS = 4100 * (\sqrt{h_s} + \sqrt{h_b})$$

h_s: altura de la antena de la estación base, en metros,

h_b: altura de la antena del barco, en metros,

Las velocidades de los cuadros, representadas en Mbps, son velocidades medias de bajada.

Para el puerto en el caso de la antena de 120° independientemente del caso que cojamos tenemos el máximo en cualquiera, por lo que la solución más barata será coger la que la ganancia del receptor es la más baja, ya que será más barato.

4 Aplicaciones

4.1 Ciudad

Vamos a comenzar con las ciudades, hemos elegido las siguientes:

- I. Moscú
- II. Madrid
- III. Barcelona
- IV. Valencia

Hemos elegido éstas porque van desde unos 10 millones de habitantes a casi un millón con lo que estamos en una ciudad grande. Hemos buscado ciudades en las que bajamos aproximadamente a la mitad de habitantes cada vez.

En todos los casos vamos a calcular el número de conexiones como:

$$1,2 * \frac{\text{población}}{4}$$

Con esto lo que hacemos es suponer en primer lugar que las familias son de media de 4 personas, por eso dividimos la población entre 4, por otra parte suponemos que de éstos un 20% además utilizará una conexión extra.

Para calcular el número de estaciones base total hacemos tres estimaciones una suponiendo un valor pico – media de 50%, otra del 100% y la última del 200%, con este cálculo podemos mitigar los efectos temporales a corto plazo. En nuestro caso hemos tenido en cuenta un factor de tiempo del 70% por lo que mirando la Figura 4-1

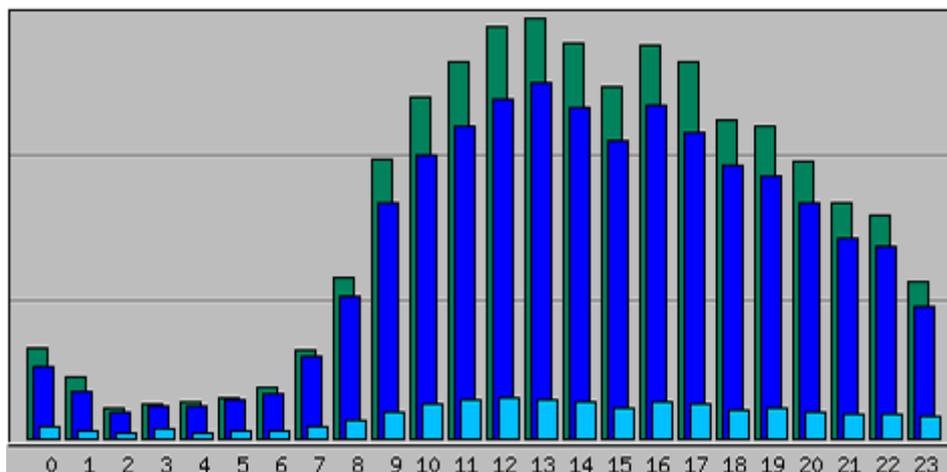


Figura 4-1: Uso de Internet

el 70% son unas 16 horas por lo que la diferencia entre la media y el valor de pico es de aproximadamente el doble, con un dimensionamiento del 200% podríamos ofrecer siempre servicio, no habría esperas para poder conectarse a la red.

En la gráfica en la que representamos el cálculo anterior, pintamos de color rojo las estaciones calculadas para cubrir las conexiones, que es una constante, y la solución debe ser siempre mayor o igual a ese valor.

De este modo tenemos de una manera bastante certera el número de estaciones base que tendríamos que montar en la ciudad para que la red este bien diseñada.

Vamos a intentar coger siempre una celda que este entre 1 y 2 km de radio en la que el número de conexiones posibles es de $4802 * 3 = 14406$ por celda. Ya que utilizamos 3 frecuencias diferentes por celda. Esto es así debido a que siempre en las celdas que estén en ese rango de radio en número de usuarios por sector será máximo, 4802, y como tenemos 3 sectores en cada estación base pues nos quedan un total de 14406 conexiones por celda.

En el caso de superar estas 14406, no podemos asegurar que todo el mundo disponga de conexión, aunque también es cierto que este caso es el perfecto, hemos tenido en cuenta que todo el mundo tiene conexión, cosa que es bastante complicada, en el momento que la densidad sea mayor tendríamos una cola de espera.

Para cada caso señalizaremos también, los enclaves de cada ciudad, es decir, los puntos en los que hay que centrarse más debido al número de personas o las grandes aglomeraciones de gente.

Las condiciones climatológicas en España, en ninguna comunidad Autónoma, son lo suficientemente graves hablando de humedad, lluvias como para que no se pueda cumplir la calidad de los enlaces.

El coste de este tipo de redes depende principalmente del número de estaciones base y del lugar en el que se encuentren, es decir, para una ciudad como Madrid, el coste del alquiler del lugar donde se instala la estación base es de entre 12000 y 15000€/año al que habría que sumarle unos 1000€ en cuestión de mantenimiento. En cambio en una zona rural al coste sería de entre 6000 y 8000€/año. El coste aproximado de la instalación de una estación base con el equipo depende del número de sectores que se quieran, en nuestro caso son 3, es aproximadamente 50000€.

A la hora de calcular el número óptimo de estaciones base, tenemos que hacer un promedio entre lo calculado en el valor pico – promedio de 1,5 y el valor pico – promedio de 2. Así obtendremos una buena solución ya que como se puede observar en la Figura 4 – 1 la el pico promedio está entre esos dos valores.

4.1.1 Moscú

Para localizar Moscú tenemos la Figura 4-2.



Figura 4-2: Moscú

En este caso Moscú como ciudad tiene aproximadamente 10500000 habitantes en una extensión de terreno de aproximadamente de 1081 km².

En la Figura 4-3 tenemos la gráfica que debemos estudiar para saber el número de estaciones base a colocar en Moscú.

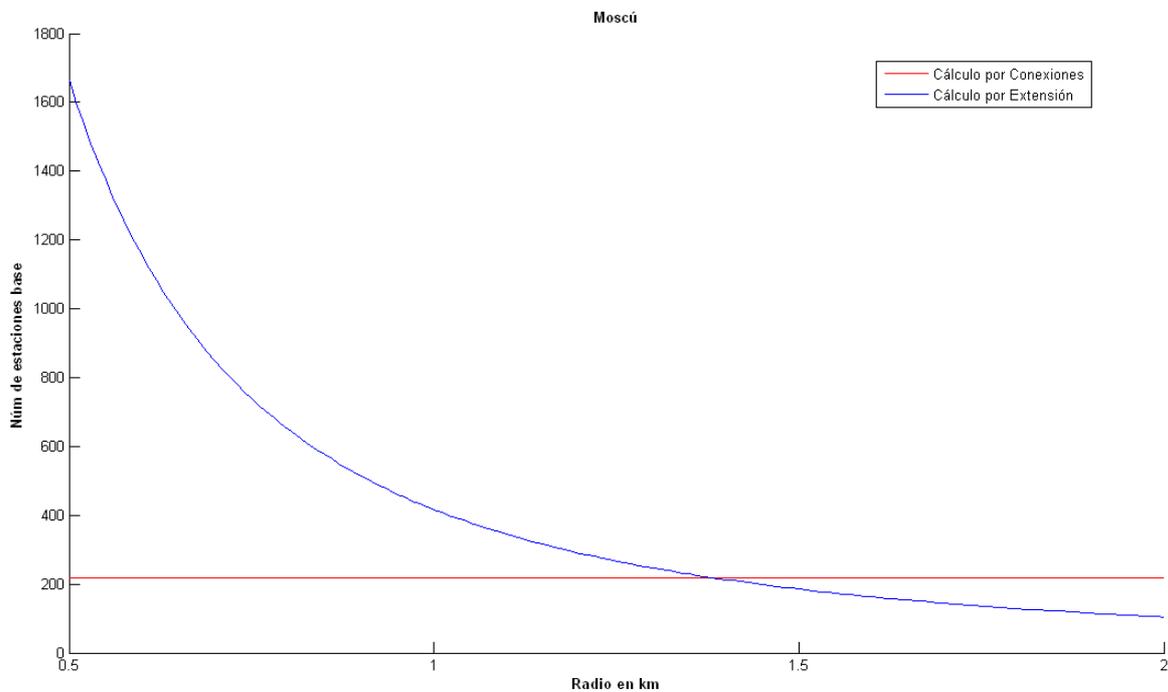


Figura 4-3: Estaciones Moscú

Todo esto lo vamos a resumir en la Tabla 4-1

Tabla 4-1: Moscú

Moscú			
Población: 10514400 personas			
Conexiones: 3154320			
Extensión(km ²): 1081			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 219 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	326	443	650
Densidad para solución final	9676 conexiones / celda	7285 conexiones / celda	4852 conexiones / celda
Radio óptimo	1130 m	980 m	800 m
Extensión final	1085,6 km ²	1083,7 km ²	1083,3 km ²

Podemos ver la ciudad desde el satélite en la Figura 4 – 4.

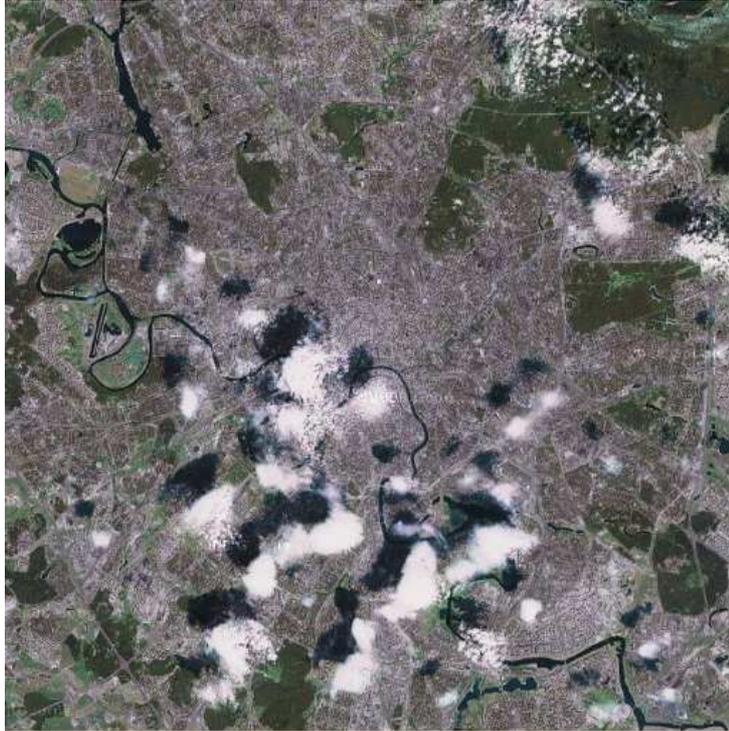


Figura 4-4: Satélite de Moscú

4.1.2 Madrid

Para localizar Madrid tenemos la Figura 4-5.

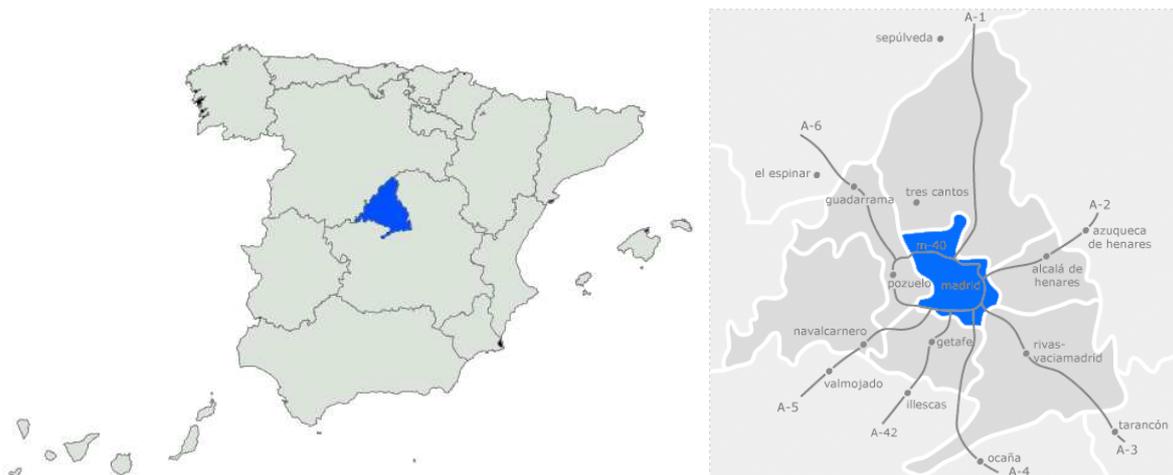


Figura 4-5: Madrid

En este caso Madrid como ciudad tiene aproximadamente 3500000 habitantes en una extensión de terreno de aproximadamente de 607 km².

En la Figura 4-6 tenemos la gráfica que debemos estudiar para saber el número de estaciones base a colocar en Madrid.

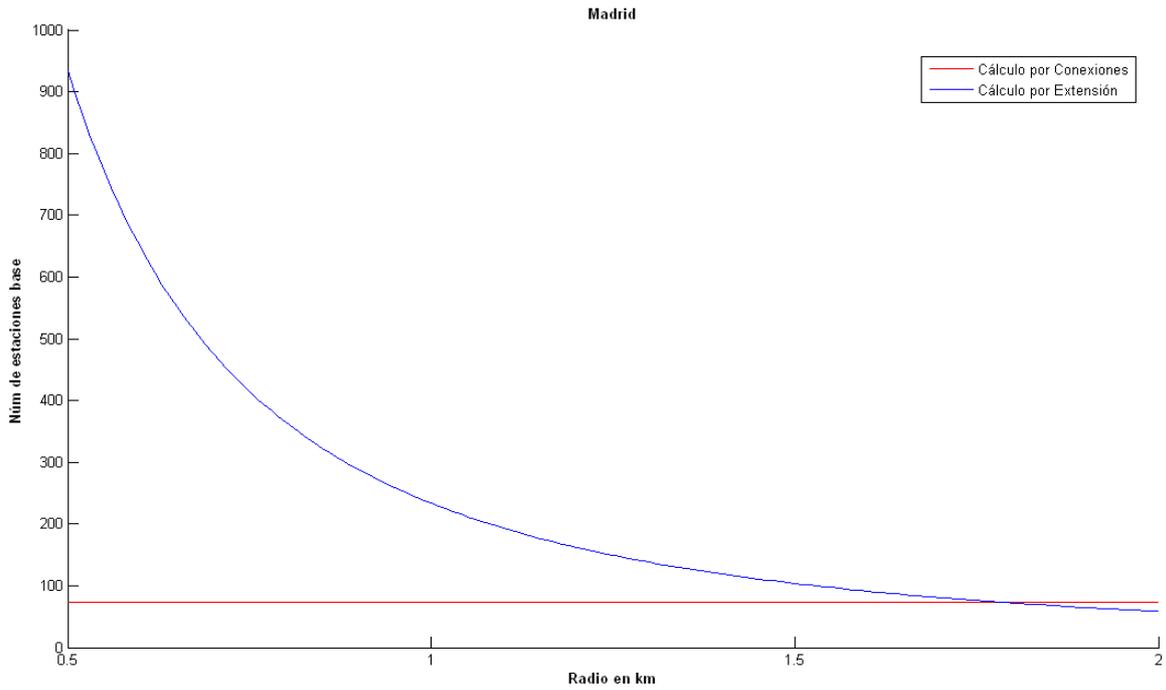


Figura 4-6: Estaciones de Madrid

Todo esto lo vamos a resumir en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Madrid

Madrid			
Población: 3500000 personas			
Conexiones: 1050000			
Extensión(km ²): 607			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 73 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	109	145	216
Densidad para solución final	9633 conexiones / celda	7241 conexiones / celda	4861 conexiones / celda
Radio óptimo	1470 m	1270 m	1040 m
Extensión final	618,02 km ²	612,25 km ²	610,23 km ²

Por otra parte no es tan necesario pero también se debería tener en cuenta los estadios de fútbol Santiago Bernabéu y Vicente Calderón. El recinto ferial Juan Carlos I o la plaza de toros de las Ventas.

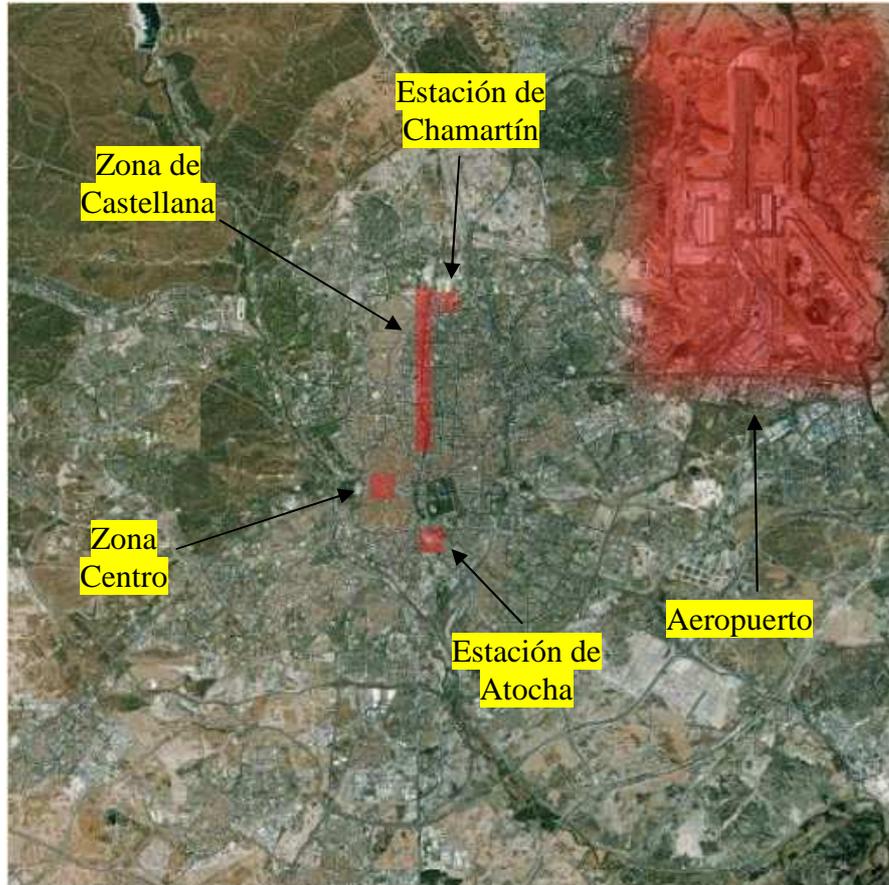


Figura 4-7: Satélite de Madrid

4.1.3 Barcelona

Para localizar Barcelona tenemos la Figura 4-8.

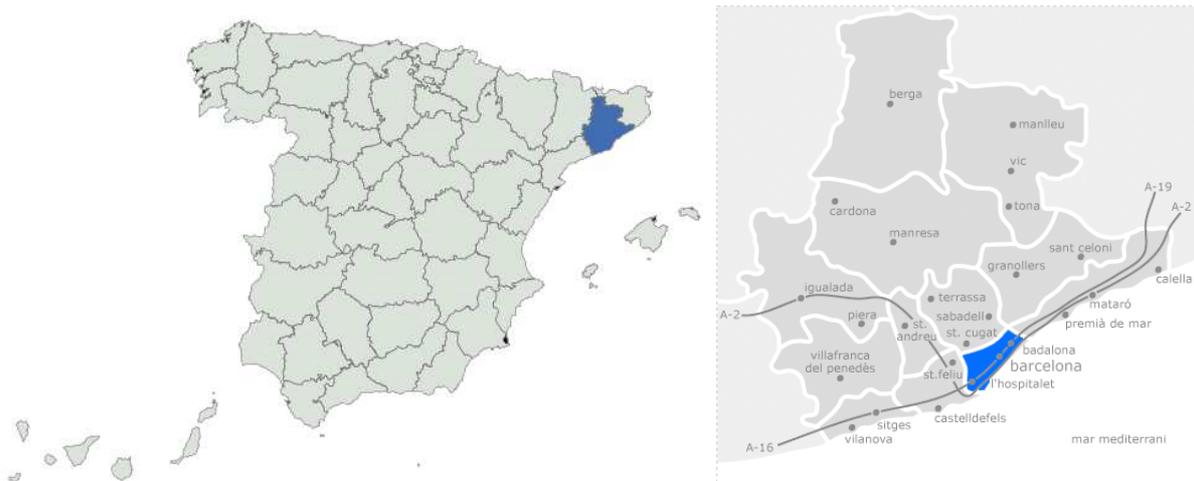


Figura 4-8: Barcelona

No se tiene en cuenta ni la playa ni el puerto que se analizará más tarde.

Analizamos la gráfica de la Figura 4-9.

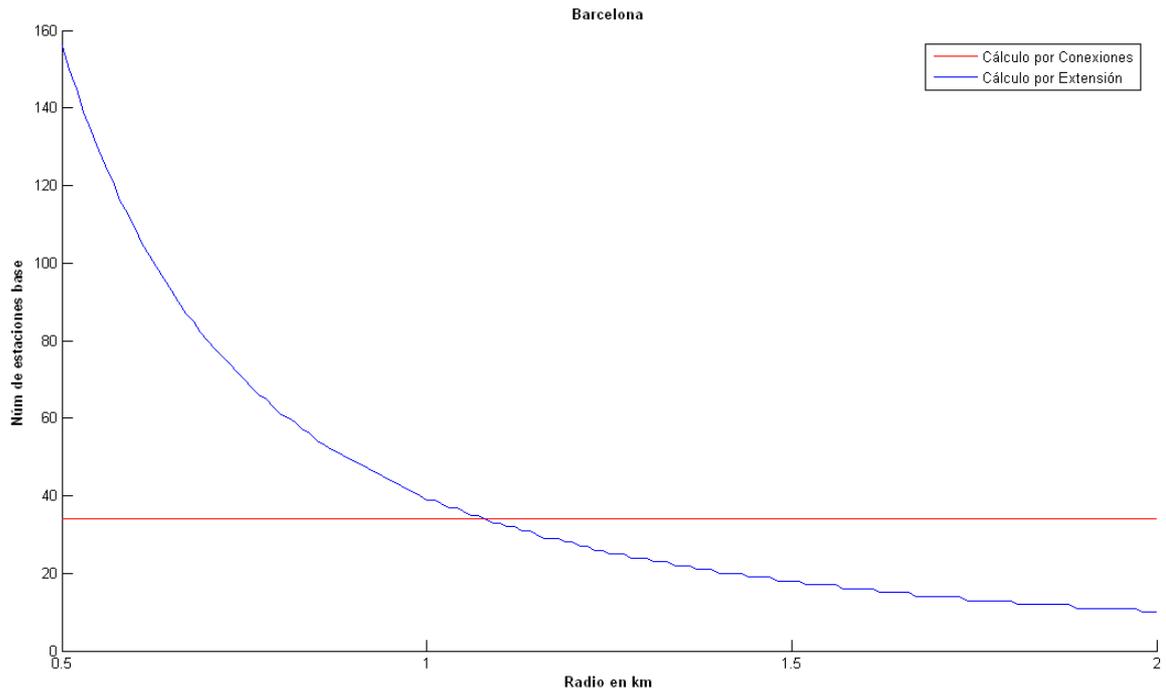


Figura 4-9: Estaciones de Barcelona

De la que obtenemos la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Barcelona

Barcelona			
Población: 1615908 personas			
Conexiones: 484773			
Extensión (km ²): 101,4			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 34 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	51	68	102
Densidad para solución final	9505 conexiones / celda	7129 conexiones / celda	4752 conexiones / celda
Radio óptimo	880 m	760 m	620 m
Extensión final	104,69 km ²	103,62 km ²	102,94 km ²

Se podría destacar el recinto ferial, y el aeropuerto de Barcelona, lo que pasa es que éste no se encuentra en la ciudad de Barcelona.

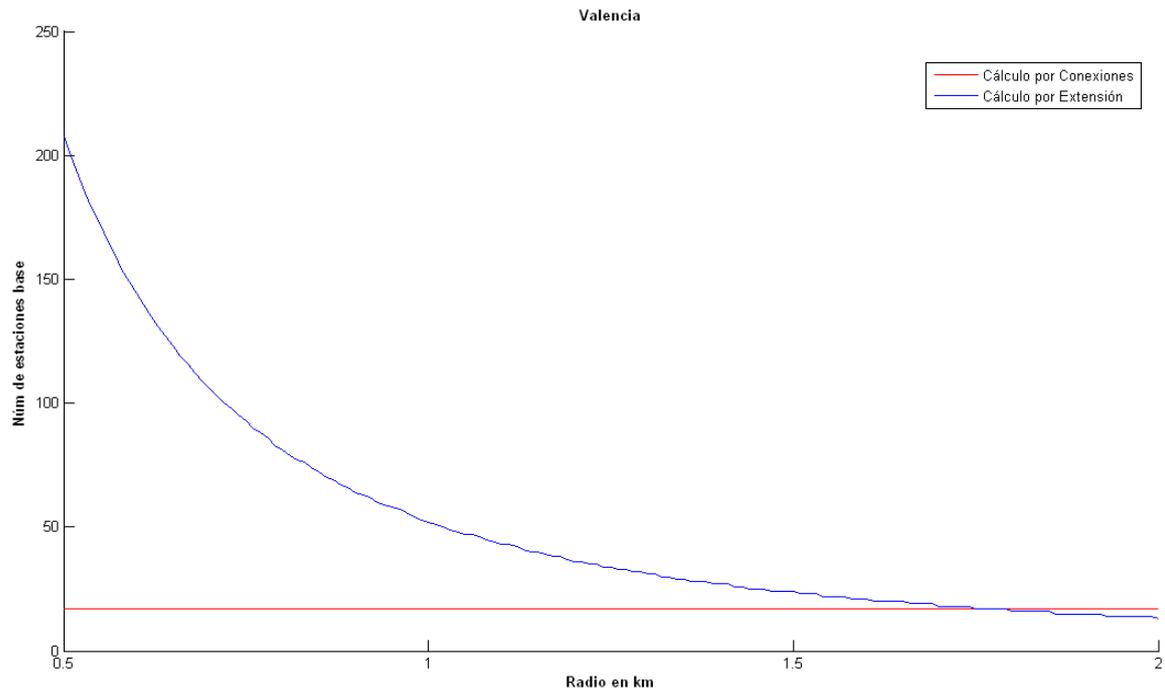


Figura 4-12: Estaciones de Valencia

De la que obtenemos la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Valencia

Valencia			
Población: 810064 personas			
Conexiones: 243020			
Extensión(km ²): 134,65			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 17 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	25	34	51
Densidad para solución final	9720 conexiones / celda	7147 conexiones / celda	4765 conexiones / celda
Radio óptimo	1440 m	1240 m	1010 m
Extensión final	140,17 km ²	139,92 km ²	137,91 km ²

Con esta solución cubrimos toda la ciudad de Valencia, incluida la playa, aunque antes hemos dicho que la playa la estudiaremos más adelante, lo que no se cubre es el mar.

Por otra parte en Valencia cabe destacar acontecimientos como la Copa América, el circuito de Fórmula 1, o el Gran Premio de Motociclismo de la Comunidad Valenciana en el circuito de Cheste. Por otra parte la época de las Fallas o la plaza de toros de Valencia.

El mapa de la ciudad se puede ver en la Figura 4-13.



Figura 4-13: Satélite de Valencia

Como hemos podido ver en las soluciones en ningún caso pasamos de 2 km de radio, dependiendo de las necesidades se podrían elegir cualquiera de las 3 opciones. Siempre depende principalmente de la densidad, ya que dependiendo de esta las celdas serán más grandes o más pequeñas, cuanto mayor es la densidad menor debe ser el tamaño de la celda.

A la hora de calcular los costes, que las celdas sean de más o menos extensión no tiene importancia ya que las antenas son adaptativas, es decir podemos regular nosotros la longitud que queramos tener.

Ahora pasamos a ciudades más pequeñas, esta se distingue de las anteriores porque tiene edificios más bajos, además el número de habitantes es menor. En la simulación los parámetros son los mismos a la hora de calcular las pérdidas.

Las ciudades que hemos elegido son las siguientes:

- I. Vigo

- II. Móstoles
- III. Santiago de Compostela
- IV. Alcobendas
- V. Segovia

Aquí vamos de una ciudad más o menos grande como pueda ser Vigo con aproximadamente 300000 habitantes, hasta una pequeña ciudad como puede ser Segovia que tiene casi 60000 habitantes.

Los cálculos que vamos a realizar son exactamente iguales que en el caso anterior. Rellenaremos la misma Tabla, y sacaremos la misma gráfica.

4.1.5 Vigo

Vigo, conocida como la *Ciudad Olívica*, es una ciudad situada en Galicia. Está situada en la parte occidental de la provincia de Pontevedra, de la que forma parte. Situada a 28 km de Pontevedra, es la ciudad más poblada de Galicia, La ciudad de Vigo fue durante las últimas décadas una de las ciudades europeas con mayor crecimiento poblacional. Con respecto a principios del siglo XX su población se multiplicó por 13 y con respecto a mediados de ese siglo, la duplicó.

La situación de Vigo se representa en la Figura 4-14.

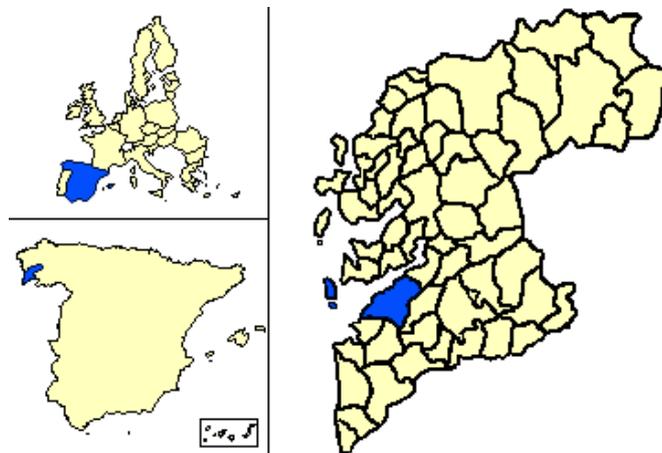


Figura 4-14: Vigo

En la Figura 4-15 mostramos la gráfica de las conexiones de Vigo.

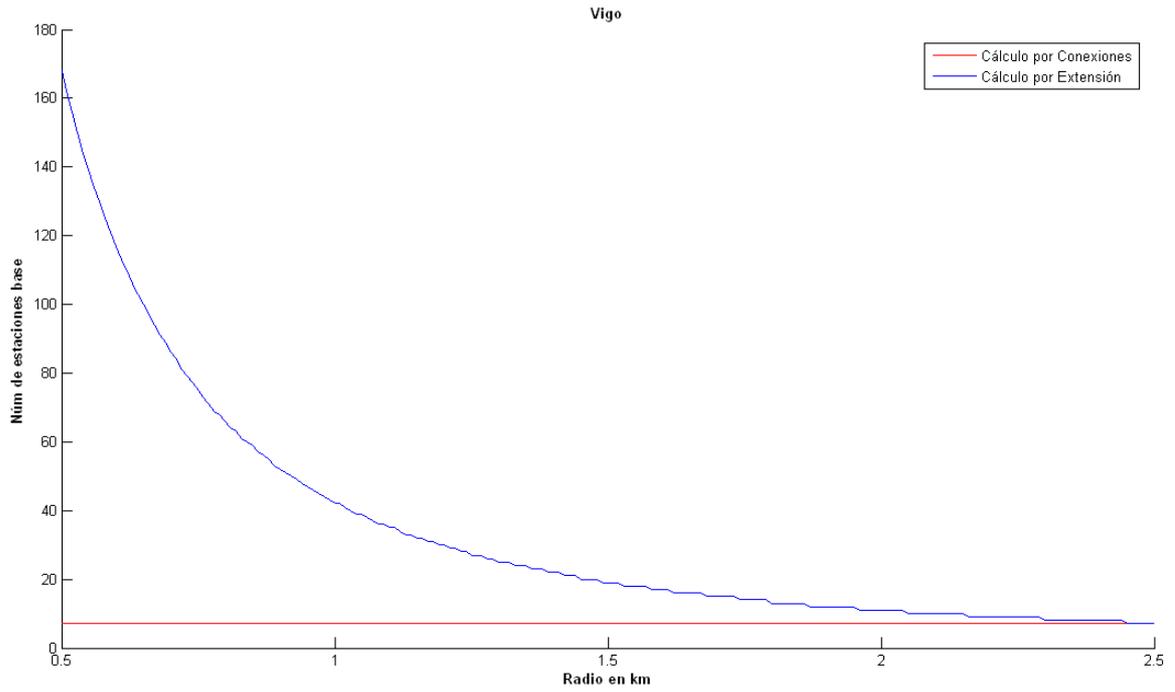


Figura 4-15: Estaciones de Vigo

De la que obtenemos la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Vigo

Vigo			
Población: 295703 personas			
Conexiones: 88711			
Extensión (km ²): 109,1			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 7 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	10	14	21
Densidad para solución final	8871 conexiones / celda	6336 conexiones / celda	4224 conexiones / celda
Radio óptimo	2050 m	1740 m	1420 m
Extensión final	120,19 km ²	118,07 km ²	115,34 km ²

En Vigo, al igual que en el resto de los entornos rurales, no vamos a tener ningún punto en el que nos deberíamos centrar.

La Figura 4-16 muestra un mapa de la ciudad.

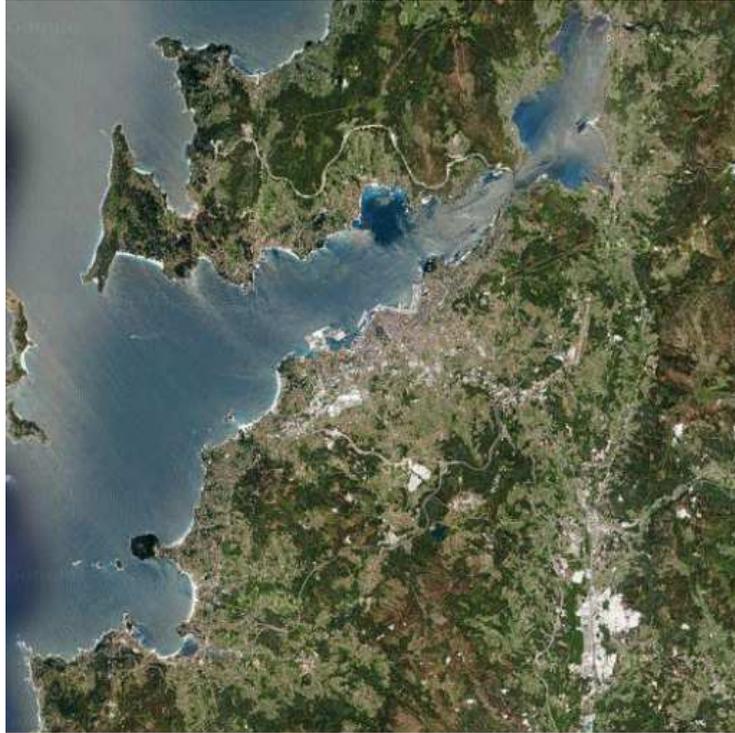


Figura 4-16: Satélite de Vigo

4.1.6 Móstoles

Móstoles es una ciudad que está situada a 18 km al sur oeste de la ciudad de Madrid, está considerado por sus habitantes como una ciudad, además de estar suscrita a la Ley de Grandes Ciudades. Móstoles ha pasado, en cuarenta años, de ser un núcleo rural de casi 4000 habitantes a mediados de los años 1960 a una ciudad dormitorio de ésta con más de 200000.

En la Figura 4-17 mostramos la grafica para calcular las estaciones base de Móstoles.

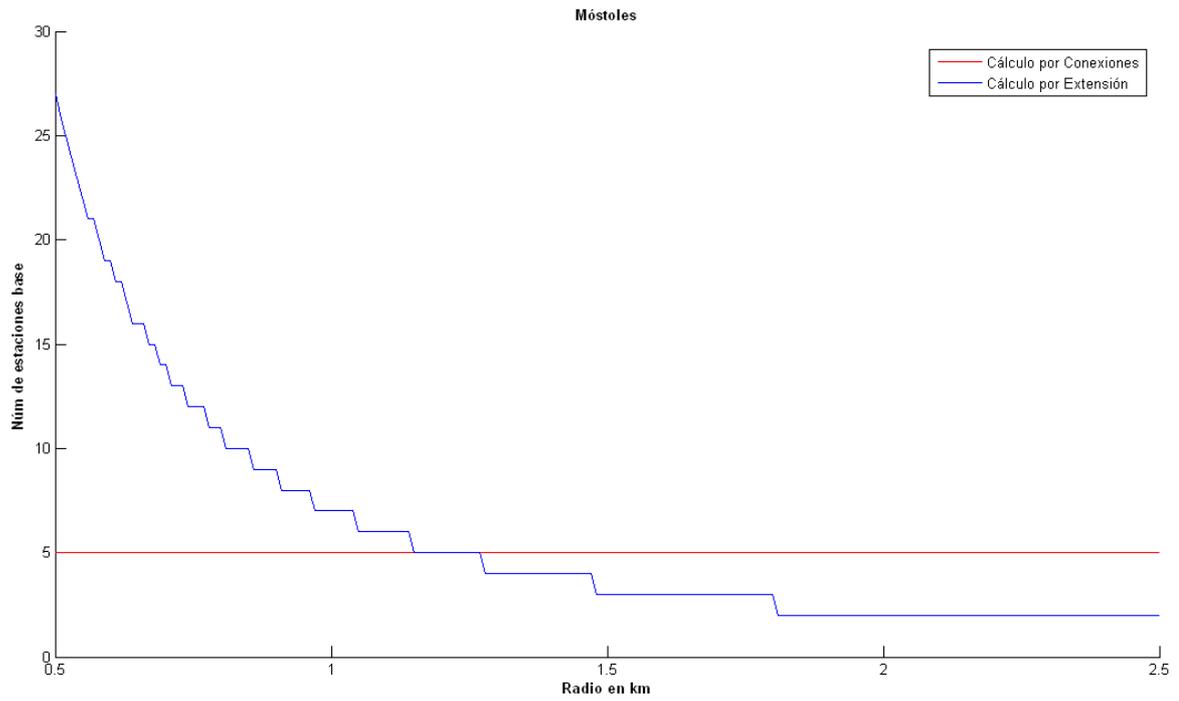


Figura 4-17: Estaciones Móstoles

De la que obtenemos la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Móstoles

Móstoles			
Población: 206275 personas			
Conexiones: 61883			
Extensión (km ²): 17			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 5 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	7	10	15
Densidad para solución final	8840 conexiones / celda	6188 conexiones / celda	4125 conexiones / celda
Radio óptimo	970 m	810 m	670 m
Extensión final	19,57 km ²	18,74 km ²	18,67 km ²

La Figura 4-18 muestra un mapa de la ciudad.

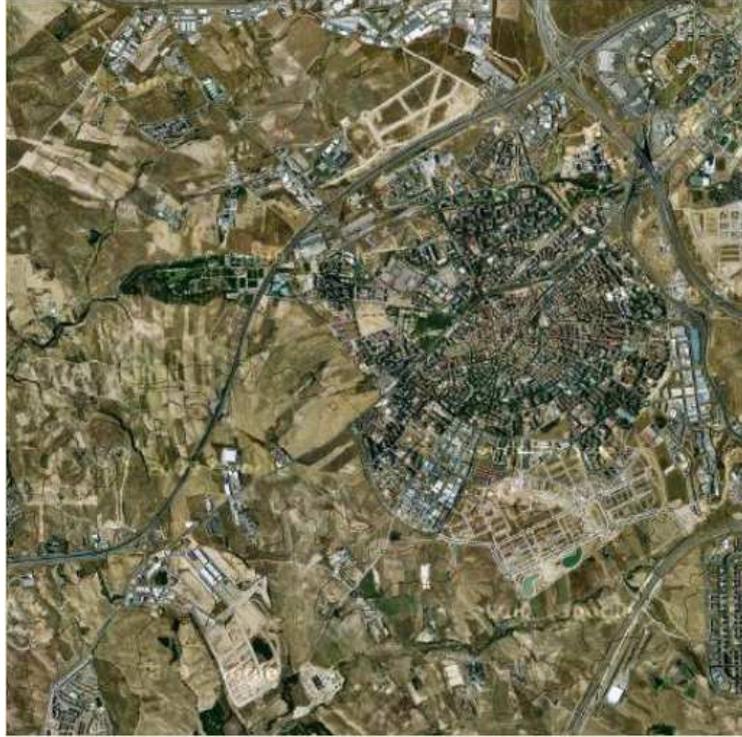


Figura 4-18: Satélite Móstoles

4.1.7 Alcobendas

Alcobendas es una ciudad con algo más de 100000 habitantes, está situada a unos 13 km al norte de la ciudad de Madrid.

La gráfica a analizar es la que se encuentra en la Figura 4-19.

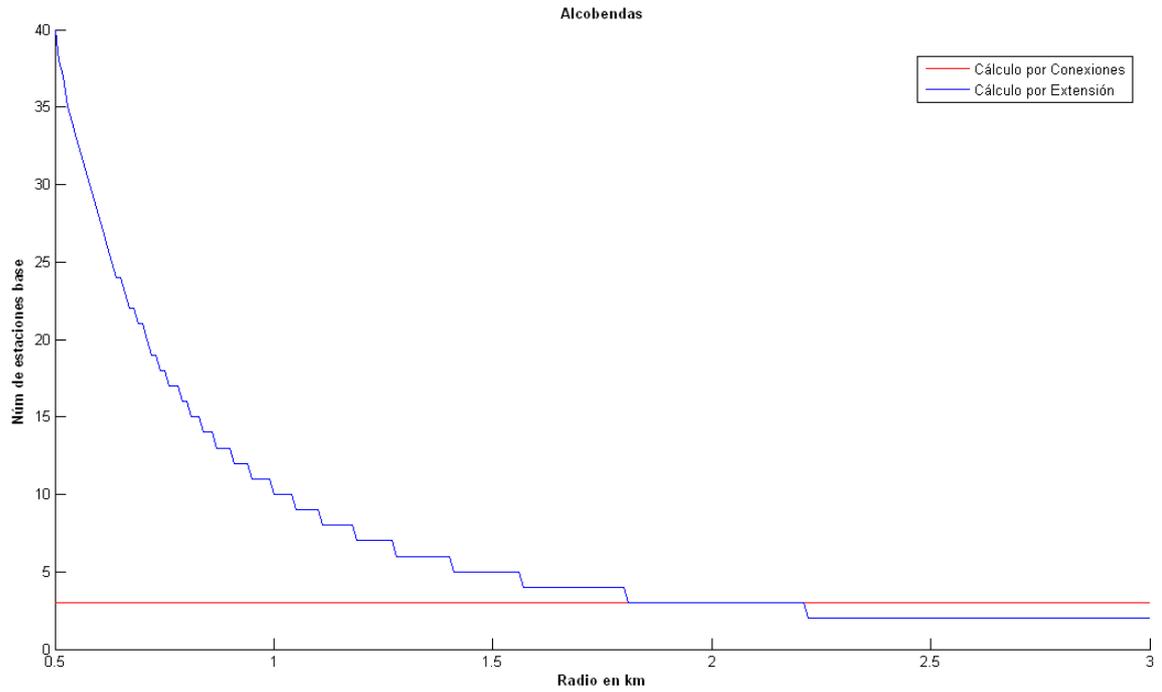


Figura 4-19: Estaciones Alcobendas

De la que obtenemos la Tabla 4-7

Tabla 4-7: Alcobendas

Alcobendas			
Población: 107514 personas			
Conexiones: 32255			
Extensión (km ²): 25,5			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 6 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	4	6	9
Densidad para solución final	8063 conexiones / celda	5375 conexiones / celda	3583 conexiones / celda
Radio óptimo	1570 m	1280 m	1050 m
Extensión final	32,04 km ²	29,81 km ²	28,66 km ²

La Figura 4-20 se muestra un mapa de la ciudad.



Figura 4-20: Satélite Alcobendas

4.1.8 Santiago de Compostela

Santiago de Compostela está situada en la provincia de La Coruña, siendo la capital de la Comunidad Autónoma de Galicia desde 1982.

Está situada a 65 kilómetros al sur de La Coruña y a 62 kilómetros al norte de Pontevedra. Incluye los antiguos municipios de Conxo e Infiesta. La ciudad antigua es Patrimonio de la Humanidad por la Unesco desde 1985.

Destaca por ser un importante núcleo de peregrinación cristiana, tras Jerusalén y Roma, debido a la creencia de que allí se dio sepultura al Apóstol Santiago el Mayor.

La gráfica que vamos a analizar está en la Figura 4-21.

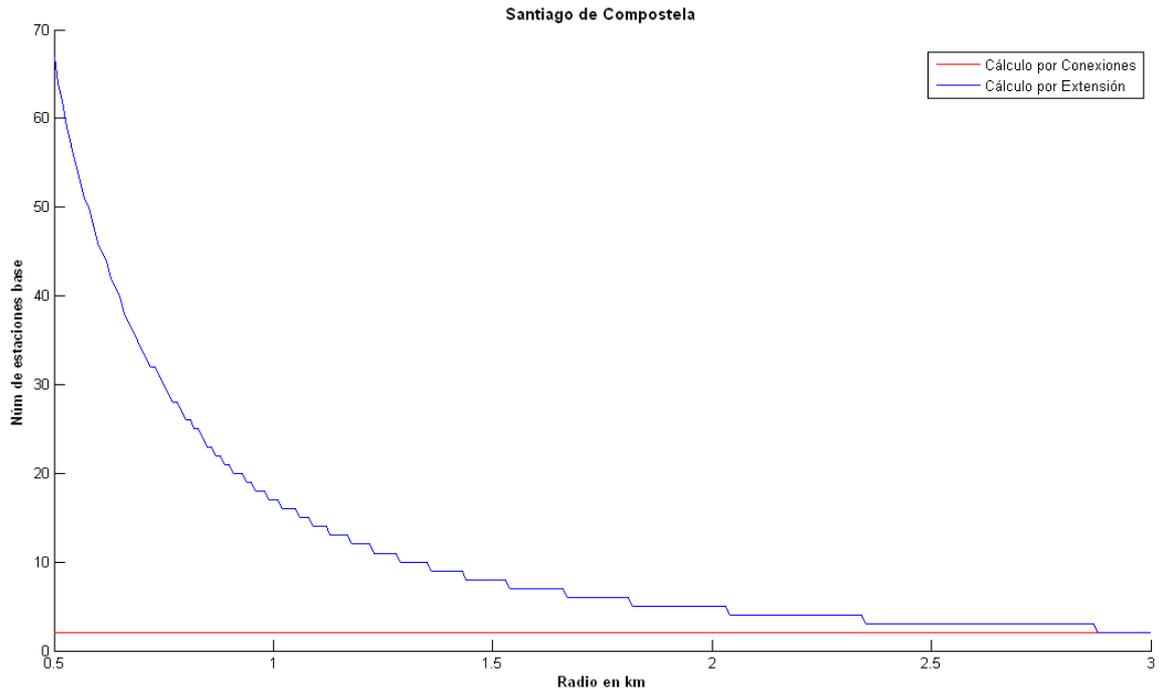


Figura 4-21: Estaciones Santiago de Compostela

Con la que sacamos la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Santiago de Compostela

Santiago de Compostela			
Población: 94339 personas			
Conexiones: 28302			
Extensión (km ²): 43			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 8 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	3	4	6
Densidad para solución final	9434 conexiones / celda	7075 conexiones / celda	4717 conexiones / celda
Radio óptimo	2350 m	2040 m	1670 m
Extensión final	57,43 km ²	54,10 km ²	50,75 km ²

La Figura 4-22 muestra un mapa de la ciudad.

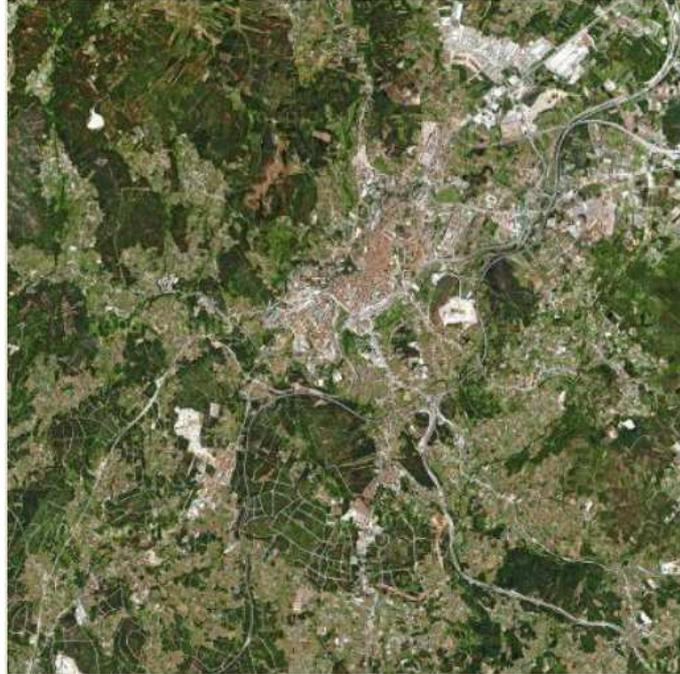


Figura 4-22: Satélite Santiago de Compostela

4.1.9 Segovia

Segovia es una ciudad situada en la parte meridional de la comunidad autónoma de Castilla y León, capital de la provincia del mismo nombre. Se sitúa en la confluencia de los ríos Eresma y Clamores al pie de la sierra de Guadarrama.

La Figura 4-23 muestra la gráfica que vamos a analizar.

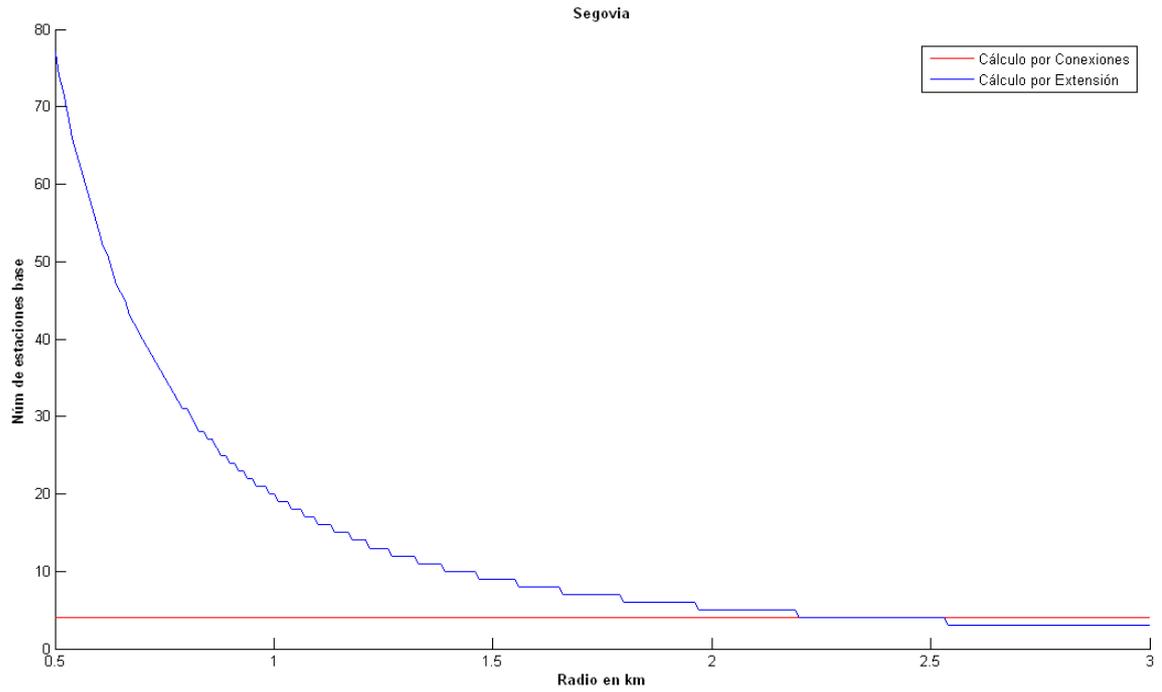


Figura 4-23: Estaciones Segovia

Con la que sacamos la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Segovia

Segovia			
Población: 56858 personas			
Conexiones: 17058			
Extensión (km ²): 50			
Cálculo por conexiones:			
Estaciones base: 4 celdas para un pico – promedio de 1			
Cálculo por estimación:			
	Solución para un pico – promedio de 1,5	Solución para un pico – promedio de 2	Solución para un pico – promedio de 3
Estaciones base	6	8	12
Densidad para solución final	2843 conexiones / celda	2132 conexiones / celda	1421 conexiones / celda
Radio óptimo	1800 m	1560 m	1270 m
Extensión final	58,96 km ²	56,94 km ²	54,51 km ²

En este caso hemos tenido que reducir el ancho de banda debido a que el número de estaciones base calculadas por conexiones era igual al calculado por la estimación gráfica, por lo que hemos tenido que bajar el ancho de banda de 10 a 5 MHz, en un principio lo hemos bajado a la mitad.

La Figura 4-24 muestra un mapa de la ciudad.



Figura 4-24: Satélite Segovia

4.2 Zonas Rurales

Las zonas rurales se distinguen de las ciudades por ser todo casas bajas o muy bajas, entre una y dos plantas, en este caso el modelo cambia, ya que los parámetros que le damos a la función para calcular las pérdidas son diferentes a los de la ciudad.

Los escenarios elegidos van a ser de muchos pueblos pequeños en población pero más o menos cerca.

Con esto lo que conseguimos es que con una celda podemos dar cobertura a varios pueblos ya que tenemos un radio de actuación de aproximadamente 2,5 km con lo que conseguimos una gran superficie.

Debido a que la población de estos pueblos es realmente pequeña no tenemos ningún problema con la densidad por lo que con una estación base es más que suficiente. Hemos escogido por ejemplo una zona en la India. Tenemos aproximadamente familias de una media de 8 miembros y unas 150 familias por pueblo y entre 25 y 40 pueblos en un radio de 5 km. Los pueblos son de aproximadamente un diámetro de 300 m. y la distancia entre éstos de 1 km.

En la Figura 4 – 25 podemos ver una distribución tal y como la que hemos comentado en el párrafo anterior.

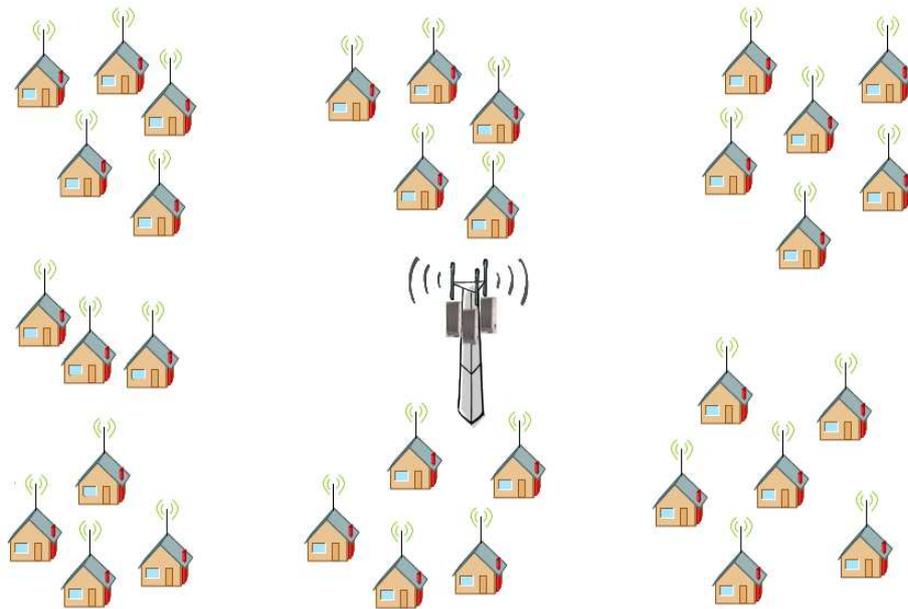


Figura 4-25: Zona Rural

4.3 Puertos

Ahora vamos a analizar los puertos.

Para el caso de los puertos tenemos una amplia zona de cobertura ya que llegamos a la distancia máxima, el LOS que en nuestro caso es de aproximadamente 35 km, a la hora de colocar las antenas en la playa, tenemos que seguir la normativa que nos dice que no podemos ponerlas a menos de 200 metros de la costa.

La idea principal no es proporcionar servicios a las personas que puedan estar en la playa, sino a todos los barcos que estén en la costa, al menos a 35 km de ésta, lo que equivale a unas 19 millas náuticas.

Los barcos pueden utilizar este sistema para cualquier tipo de consulta en Internet o un gran uso que se le está dando hoy en día es para en todo momento saber que se cantidades de pescado o marisco traen los barcos para que la lonja pueda hacer la subasta antes incluso de tener la mercancía.

Las simulaciones que hemos realizado para esta parte son diferentes ya que la distancia es fija (35 km) pero la antena receptora cambia hemos hechos simulaciones con una antena de ganancia 8, 10 y 12 dB, siendo la antena transmisora de 60°, 90° y 120°.

En este caso vamos a instalar estaciones base de 2 sectores, con un ángulo total de 240° con lo que nos aseguramos cubrir toda la costa. Con esta configuración también cubrimos una zona de la playa que aunque no es nuestro planteamiento ahí lo tenemos.

Obtenemos el diagrama de la Figura 4-26.

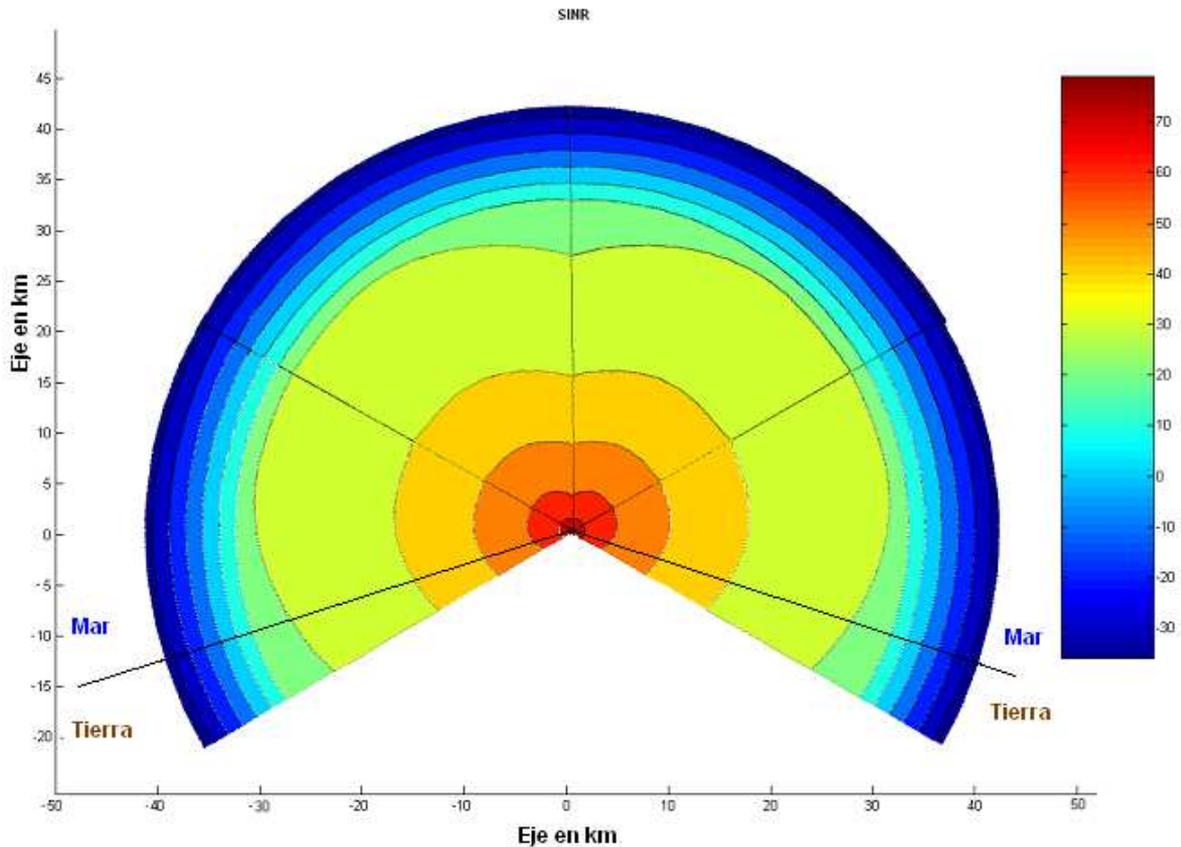


Figura 4-26: Diagrama de Puerto 240°

Analizando la Figura 4-25 podemos ver que tenemos una anchura de unos 80 km aproximadamente y desde la estación base hacia adelante unos 35 km y hacia atrás 15 km aproximadamente.

Para evitar cubrir una zona de la playa también se puede plantear una configuración de 180° , ya que con lo que hemos comentado antes de las antenas se puede cambiar el haz y poner 90° .

Con esto obtenemos un diagrama como el que se puede ver en la Figura 4-27.

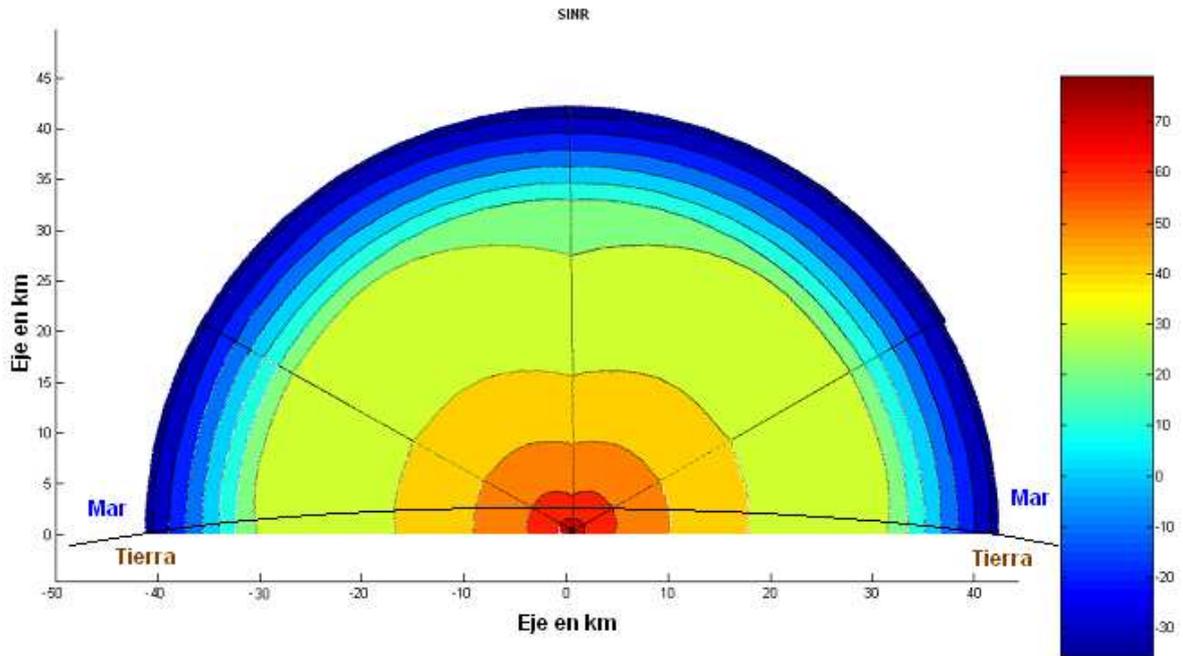


Figura 4-27: Diagrama de Puerto 180°

Los principales puertos de España son los siguientes:

- I. Barcelona
- II. Vigo
- III. Algeciras
- IV. Valencia

Estos son los principales puertos de la Península, es muy difícil hacer una estimación de cuantos barcos diariamente se mueven por los puertos españoles, ya sea por los puertos de mercancías o deportivos. Aun así es difícil que se superen el número máximo de conexiones instantáneas que podemos ofrecer, con los números obtenidos podemos afirmar que cualquier puerto de España estaría perfectamente cubierto con tan sólo una estación base.

Uno de los puertos más a tener en cuenta es el de Valencia, no solo por la cantidad de barcos que puedan entrar o salir sino por dos grandes acontecimientos que se celebran, el Gran Premio de Fórmula 1 y la copa América.

En la Figura 4-28 podemos ver una foto del puerto tomada desde el satélite. Aquí podemos apreciar todo, tanto el puerto deportivo como el puerto mercantil y el ancho es de aproximadamente 5 km.



Figura 4-28: Satélite puerto de Valencia

4.4 Otros

Por otra parte durante todo este apartado, sobre todo en las grandes ciudades, hemos hablado que hay sitios o acontecimientos eventuales que deberíamos tener en cuenta a la hora de hacer los cálculos, ya que durante unas horas o varios días, la población aumenta considerablemente.

Para esto se utilizan estaciones base móviles, se trata de montar sobre un vehículo una estación base, la comunicación con la red se puede hacer mediante satélite o si es posible se conecta a la red general. Un ejemplo de estación base móvil se muestra en la Figura 4-29.



Figura 4-29: Estación base móvil

Dependiendo de las necesidades pondríamos más o menos vehículos. Para poder ofrecer el servicio al mayor grupo de personas posible.

Para acceder a la red sería necesario ingresar un usuario y una contraseña, de este modo se evitaría tener duplicados, es decir, paga uno y se conectan más de uno.

En el caso de que alguien necesitase en exclusiva un canal se le podría asignar. Es decir lo utilice o no siempre estará conectado nunca, aunque la red este saturada, se quedara sin conexión.

Todas las estaciones están conectadas entre ellas por un radioenlace de antenas direccionales, de este modo se tiene la máxima información del estado de la red, la sobrecarga etc.

5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

Como se puede apreciar WiMAX es una tecnología que al ser inalámbrica no tenemos grandes costes de instalación, ya que no tenemos que hacer tanta obra civil como en otro tipo de instalaciones, como pueda ser la fibra óptica. Al usar frecuencias en las que no se necesita licencia, ahorramos costes, ya que no tenemos que pagar nada.

Además de las ganancias un dato muy importante es la altura de las antenas ya que con un poco más de altura podemos conseguir grandes mejoras. Cuanto más altas están las antenas tanto la antena de la estación base como la antena del cliente mejor será señal.

Cuanto más grandes son las ciudades necesitamos más celdas y más anchura de banda.

El radio de trabajo en la ciudad es más pequeño que en la zona rural, por otra parte la más grande es en la zona costera ya que llegamos la LOS.

WiMAX no es para nada un competidor de Wi-Fi ya que podemos utilizar WiMAX como red de acceso y Wi-Fi para usarlo dentro del hogar.

5.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone estudiar más en detalle la tecnología WiMAX, sobre todo la parte de WiMAX móvil ya que aunque algo se ha hablado en este proyecto consideramos que se puede profundizar mucho más. En el caso de los barcos, es móvil pero no todo lo móvil que puede ser.

Referencias

- [1] <http://www.inteco.es/file/1000115210>
- [2] <http://www.cienciafacil.com/paghistoriaradio.html>
- [3] José María Hernando Rábanos, “Transmisión por Radio”, Marzo 2006.
- [4] Manuel Sierra Pérez, “Electrónica de Comunicaciones”, 2003.
- [5] <http://www.fernandoflores.cl/node/1590>
- [6] http://80.24.102.10/wireless/antenas/Conceptos_basicos_sobre_antenas.pdf
- [7] <http://www.qsl.net/lu9aum/diversidad.htm>
- [8] Syed Ahson, Mohammad Ilyas, “WiMAX Technologies, Performance Analysis and QoS”, 2008.
- [9] Frank Ohrtman, “WiMAX handbook, Building 802-16 Wireless Networks”, 2005.
- [10] GARD, Vigia K y WILKES, Joseph E. wireless and personal communications systems. Mexico: Prentice Hall, 1996.
- [11] <http://espanol.stelladoradus.com/2.6.ghz.remote.tilt.php>
- [12] http://arantxa.ii.uam.es/~tco/Documentacion/Tema_IV_4_Transmision_Digital_Paso_Banda_con_Ruido_AWGN_ver0.pdf
- [13] <http://espanol.stelladoradus.com/2.6.ghz.remote.tilt.php>
- [14] <http://observatorio.cnice.mec.es/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=349&mode=thread&order=0&thold=0&POSTNUNKESID=31f62965d16493d385535a8a94afe20c>
- [15] <http://es.wikipedia.org>
- [16] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16e-2005.pdf>
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying
- [18] <http://www.wimaxforum.org/>

- [19] <http://www.error500.net/2008-ano-wimax>
- [20] www.rfdesign.com
- [21] <http://www.etsi.org/>
- [22] www.cept.org/index.html
- [23] www.iso.org

Anexos

A Manual del programador

%% Código para el Cálculo del SINR y representación de los sectores de ciudades y zonas rurales

%% Autor: Fernando López Delegido

clc

clear all

close all

warning off

tic

for radio=1:12

%radio =sqrt(1/pi) %kilometros grupo B = 7km // grupo A = 5 km

grados=3; %grados

num_circulos=100 ;

matrizSINR=[];

tasabin=zeros();

modulacion=[];

angulo_inicial=30;

angulo_final=90;

numerito=3;

pasoang=5;

anchobanda=10;

eficiencia=0.8;

down=0.75; %downlink el 75% y reservamos el 25% para uplink y gestion

ftime=0.7; %factor de tiempo

%gasto diario de un usuario

email=15*0.1*8; %15 mails a 0,1MB cada uno con archivos adjuntos

web=50*0.5*8; %50 pags web a 500kB cada una

video=2*3*8; %2videos de unos 3 megas

otros=10*8; %10MB

total=email+web+video+otros;

% numerito=input('Tipo de antena 90° - 1, 60° - 2, 120° -3: ');

radios_medios=zeros(1,num_circulos);

angulos=(angulo_final-angulo_inicial)/grados;

array_ang=zeros(1,length(angulos+1));

```

array_ang(1)=angulo_inicial;
for i=2:angulos+1;

    array_ang(i)=array_ang(i-1)+grados;

end
array_ang2=array_ang*2*pi/360;
Lps=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));

i1=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));
i2=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));

s=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));

sinr=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));

Grx1=10; %dB

Ptx=10; % watos
Ptxdb=30+10*log10(Ptx);

angulo_final=angulo_final*2*pi/360;
angulo_inicial=angulo_inicial*2*pi/360;
grados=grados*2*pi/360;
pasoang=pasoang*2*pi/360;

radios_medios(1)=0.01*radio;
for i=2:num_circulos

    radios_medios(i)=(0.01+(0.91-0.01)*i/num_circulos)*radio;

end
[p Gtx]=antenas( numerito, angulo_final, angulo_inicial, pasoang);
[p60 Gtx]=antenas(2, angulo_final, angulo_inicial, pasoang);
componenteX1=1.5*radio;
componenteY1=4.333*radio;

%Calculo de areas

contador=0;
for i=2:num_circulos
    contador=contador+1;
    areas(contador)=(pi*radios_medios(i)*radios_medios(i)-pi*radios_medios(i-1)*radios_medios(i-1))/(2*pi/(angulo_final-angulo_inicial))/angulos;
end

areas=areas/(0.433*radio*radio);

```

```

c0=3*10^8;

f1=2.5; %Ghz

lambda=c0/(f1*10^9);
d0=100;
A=20*log10(4*pi*d0/lambda);

hb=30;
%dependiendo del tipo tenemos
% %% Tipo A Zona montañosa con muchos obstaculos
a=4.6;
b=0.0075;
c=12.6;

%% Tipo B Intermedio
% a=4;
% b=0.0065;
% c=17.1;

gamma=a-b*hb+c/hb;

h=2;
iPLf=6*log10(f1*1000/2000);%f en megas
iPLh=-10.8*log10(h/2);%para a y b

contadors=0;
for k=angulo_inicial:grados:angulo_final
    for i=1:num_circulos
        d=radios_medios(i);
        Lps(i)=A+10*gamma*log10(d*1000/d0)+iPLf+iPLh;
        contadors=contadors+1;
        s(contadors)=10^((Ptxdb-Lps(i)+Gtx-polyval(p,k)+Grx1)/10);
    end
end
contador=0;

for k=angulo_inicial:grados:angulo_final

    for i=1:num_circulos

        dx=componenteX1-radios_medios(i)*cos(k);
        dy=componenteY1+radios_medios(i)*sin(k);
        d=sqrt(dx*dx+dy*dy);
        Lps(i)=A+10*gamma*log10(d*1000/d0)+iPLf+iPLh;
        contador=contador+1;
        angulointer=atan(dx/dy);
        inter1(contador)=10^((Ptxdb-Lps(i)+Gtx-polyval(p,k)+polyval(p60,angulointer))/10);
    end
end

```

```

    end

end

contador2=0;

for k=angulo_inicial:grados:angulo_final

    for i=1:num_circulos

        dx=componenteX1+radios_medios(i)*cos(k);
        dy=componenteY1+radios_medios(i)*sin(k);
        d=sqrt(dx*dx+dy*dy);
        Lps(i)=A+10*gamma*log10(d*1000/d0)+iPLf+iPLh;
        contador2=contador2+1;
        angulointer=atan(dx/dy);
        inter2(contador2)=10^((Ptxdb-Lps(i)+Gtx-polyval(p,k)+polyval(p60,90-
angulointer))/10);

    end

end

beta=anchobanda;
Ndb=-114+10*log10(beta);
nn=10^(Ndb/10);

for i=1:num_circulos*(angulos+1)

    sinr(i)=s(i)/(inter1(i)+inter2(i)+nn);

end

for i=1:num_circulos*(angulos+1)

    SINRdb(i)=10*log10(sinr(i));

end

minimo(radio)=min(SINRdb)
for i=1:angulos+1
    for j=1:num_circulos
        matrizSINR(i,j)=SINRdb((i-1)*num_circulos+j);
    end
end

for i=1:angulos+1
    for j=1:num_circulos
        coordenadax(i,j)=radios_medios(j)*cos(array_ang2(i));
    end
end

```

```

        coordenaday(i,j)=radios_medios(j)*sin(array_ang2(i));
    end
end
areas=[0 areas];
for i=1:angulos+1
    for j=1:num_circulos
        tasa((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
        tasa((i-1)*num_circulos+j,2)=areas(j);
    end
end

media(radio)=calculo_tasas(tasa,anchobanda,eficiencia);

vdown(radio)=media(radio)*down

conexiones(radio)=vdown(radio)*(60*60*24*ftime)/(total)

for i=1:angulos+1
    for j=1:num_circulos
        if matrizSINR(i,j)<=6.4
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=1;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=1;
        elseif matrizSINR(i,j)<=9.4
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=2;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=1/2;
        elseif matrizSINR(i,j)<=11.2
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=3;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=3/4;
        elseif matrizSINR(i,j)<=16.4
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=4;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=1/2;
        elseif matrizSINR(i,j)<=18.2
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=5;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=3/4;
        elseif matrizSINR(i,j)<=22.7
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=6;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=2/3;
        else
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=7;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=3/4;
        end
    end
end
end

```

```

% 1 --> 'BPSK'
% 2 --> 'QPSK' 1/2
% 3 --> 'QPSK' 3/4
% 4 --> '16-QAM' 1/2
% 5 --> '16-QAM' 3/4
% 6 --> '64-QAM' 2/3
% 7 --> '64-QAM' 3/4
bpsk=0;
qpsk=0;
qpsk2=0;
qam16=0;
qam162=0;
qam64=0;
qam642=0;
%Estadisticas
for i=1:(angulos+1)*num_circulos
    if modulacion(i,2)==1
        bpsk=bpsk+1;
    elseif modulacion(i,2)==2
        qpsk=qpsk+1;
    elseif modulacion(i,2)==3
        qpsk2=qpsk2+1;
    elseif modulacion(i,2)==4
        qam16=qam16+1;
    elseif modulacion(i,2)==5
        qam162=qam162+1;
    elseif modulacion(i,2)==6
        qam64=qam64+1;
    elseif modulacion(i,2)==7
        qam642=qam642+1;
    end
end
por_bpsk=bpsk/((angulos+1)*num_circulos);
por_qpsk=qpsk/((angulos+1)*num_circulos);
por_qpsk2=qpsk2/((angulos+1)*num_circulos);
por_16qam=qam16/((angulos+1)*num_circulos);
por_16qam2=qam162/((angulos+1)*num_circulos);
por_64qam=qam64/((angulos+1)*num_circulos);
por_64qam2=qam642/((angulos+1)*num_circulos);

figure
hold on
contourf(coordenadax,coordenaday,matrizSINR)
contourf(-coordenadax,coordenaday,matrizSINR)
xlabel('\bfEje en km')
ylabel('\bfEje en km')
title('\bfSINR')
hold off
axis equal

```

```
end
figure
plot(conexiones)
xlabel('\bfRadio en km')
ylabel('\bfNúm de usuarios')
title('\bfUsuarios')
```

```
toc
```

```
%% Código para el Cálculo del SINR y representación de los sectores de los
%% puertos
%% Autor: Fernando López Delegido
```

```
clc
clear all
close all
warning off
```

```
tic
%for radio=1:40
radio=35;%kilometros LOS 35
grados=3;% grados
num_circulos=100;
hu=5;
matrizSINR=[];
tasabin=zeros();
modulacion=[];
angulo_inicial=30;
angulo_final=90;
pasoang=5;
numerito=3;
anchobanda=10;
eficiencia=0.8;
down=0.75; %descarga el 75% y reservamos el 25% para uplink y gestion
```

```
ftime=0.7;%factor de tiempo
```

```
%gasto diario de un usuario
email=15*0.1*8; % 15 mails a 1MB cada uno con archivos adjuntos
web=50*0.5*8; % 50 pags web a 500kB cada una
video=2*3*8; % 2 videos de unos 3 megas
otros=10*8; % 10MB
```

```
total=email+web+video+otros;
```

```
% numerito=input('Tipo de antena 90° - 1, 60° - 2, 120° -3: ')
```

```

radios_medios=zeros(1,num_circulos);

angulos=(angulo_final-angulo_inicial)/grados;

array_ang=zeros(1,length(angulos+1));

array_ang(1)=angulo_inicial;
for i=2:angulos+1;

    array_ang(i)=array_ang(i-1)+grados;

end
array_ang2=array_ang*2*pi/360;
%Lps=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));

i1=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));
i2=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));

s=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));

sinr=zeros(1,num_circulos*(angulos+1));

Grx1=12; %dB

Ptx=12; %wattios
Ptxdb=30+10*log10(Ptx);

angulo_final=angulo_final*2*pi/360;
angulo_inicial=angulo_inicial*2*pi/360;
grados=grados*2*pi/360;
pasoang=pasoang*2*pi/360;

radios_medios(1)=0.01*radio;
for i=2:num_circulos

    radios_medios(i)=(0.01+(1.2-0.01)*i/num_circulos)*radio;

end
[p Gtx]=antenas( numerito, angulo_final, angulo_inicial, pasoang);
[p60 Gtx]=antenas(2, angulo_final, angulo_inicial, pasoang);
componenteX=(1+2*0.866)*radio;
componenteY=4*0.866*radio;

%Calculo de areas
%
contador=0;
for i=2:num_circulos
    contador=contador+1;

```

```

        areas(contador)=(pi*radios_medios(i)*radios_medios(i)-pi*radios_medios(i-
1)*radios_medios(i-1))/(2*pi/(angulo_final-angulo_inicial))/angulos;
        end

areas=areas/(0.433*radio*radio);

% area total es 0.8481 R2

c0=3*10^8;

f1=2.5; %Ghz
%f2=3.5;

lambda=c0/(f1*10^9);
d0=100;
A=20*log10(4*pi*d0/lambda);

hb=40;
%dependiendo del tipo tenemos
%% Tipo A Zona montañosa con muchos obstaculos
% a=4.6;
% b=0.0075;
% c=12.6;

% %% Tipo B Intermedio
% a=4;
% b=0.0065;
% c=17.1;

%
% %% Tipo C Llano sin obstaculos
a=3.6;
b=0.005;
c=20;

gamma=a-b*hb+c/hb;

h=2;
iPLf=6*log10(f1*1000/2000);%f en megas
%iPLh=-10.8*log10(h/2);%para a y b
iPLh=-20*log10(h/2); %para c

Rb=(4*hb*hu/lambda);
Lun= 20*log10(4*pi/(lambda));

%Playa
LOS=4100*(sqrt(hu)+sqrt(hb))

```

```

contadors=0;
for k=angulo_inicial:grados:angulo_final
    for i=1:num_circulos
        d=radios_medios(i);
        if (d*1000<=Rb)
            Lps(i)=Lun + 20*log10(d*1000);
        else
            if (d*1000 > 0.9*LOS)
                Lps(i)=Lun + 20*log10(Rb) + 40*log10(d*1000/Rb)+ 20*(((d*1000-
(0.9*LOS))/(0.1*LOS)));
            else
                Lps(i)=Lun + 20*log10(Rb) + 40*log10(d*1000/Rb);
            end
        end

        contadors=contadors+1;
        s(contadors)=10^((Ptxdb-Lps(i)+Gtx-polyval(p,k)+Grx1)/10);
    end
end

```

```

beta=anchobanda;
Ndb=-114+10*log10(beta);
nn=10^(Ndb/10);
%nn=0;

```

```

for i=1:num_circulos*(angulos+1)

    sinr(i)=s(i)/(nn);

```

```
end
```

```
for i=1:num_circulos*(angulos+1)
```

```
    SINRdb(i)=10*log10(sinr(i));
```

```
end
```

```
minimo(radio)=min(SINRdb)
```

```
for i=1:angulos+1
```

```
    for j=1:num_circulos
```

```
        matrizSINR(i,j)=SINRdb((i-1)*num_circulos+j);
```

```
    end
```

```
end
```

```
for i=1:angulos+1
```

```
    for j=1:num_circulos
```

```
        coordenadax(i,j)=radios_medios(j)*cos(array_ang2(i));
```

```

        coordenaday(i,j)=radios_medios(j)*sin(array_ang2(i));
    end
end
areas=[0 areas];
for i=1:angulos+1
    for j=1:num_circulos
        tasa((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
        tasa((i-1)*num_circulos+j,2)=areas(j);
    end
end

media(radio)=calculo_tasas(tasa,anchobanda,eficiencia);

vdown(radio)=media(radio)*down

conexiones(radio)=vdown(radio)*(60*60*24*ftime)/(total)

for i=1:angulos+1
    for j=1:num_circulos
        if matrizSINR(i,j)<=6.4
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=1;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=1;
        elseif matrizSINR(i,j)<=9.4
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=2;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=1/2;
        elseif matrizSINR(i,j)<=11.2
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=3;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=3/4;
        elseif matrizSINR(i,j)<=16.4
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=4;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=1/2;
        elseif matrizSINR(i,j)<=18.2
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=5;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=3/4;
        elseif matrizSINR(i,j)<=22.7
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=6;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=2/3;
        else
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,1)=matrizSINR(i,j);
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,2)=7;
            modulacion((i-1)*num_circulos+j,3)=3/4;
        end
    end
end
end

```

```

% 1 --> 'BPSK'
% 2 --> 'QPSK' 1/2
% 3 --> 'QPSK' 3/4
% 4 --> '16-QAM' 1/2
% 5 --> '16-QAM' 3/4
% 6 --> '64-QAM' 2/3
% 7 --> '64-QAM' 3/4
bpsk=0;
qpsk=0;
qpsk2=0;
qam16=0;
qam162=0;
qam64=0;
qam642=0;
%Estadísticas
for i=1:(angulos+1)*num_circulos
    if modulacion(i,2)==1
        bpsk=bpsk+1;
    elseif modulacion(i,2)==2
        qpsk=qpsk+1;
    elseif modulacion(i,2)==3
        qpsk2=qpsk2+1;
    elseif modulacion(i,2)==4
        qam16=qam16+1;
    elseif modulacion(i,2)==5
        qam162=qam162+1;
    elseif modulacion(i,2)==6
        qam64=qam64+1;
    elseif modulacion(i,2)==7
        qam642=qam642+1;
    end
end
por_bpsk=bpsk/((angulos+1)*num_circulos);
por_qpsk=qpsk/((angulos+1)*num_circulos);
por_qpsk2=qpsk2/((angulos+1)*num_circulos);
por_16qam=qam16/((angulos+1)*num_circulos);
por_16qam2=qam162/((angulos+1)*num_circulos);
por_64qam=qam64/((angulos+1)*num_circulos);
por_64qam2=qam642/((angulos+1)*num_circulos);

% figure
% surf(coordenadax,coordenaday,matrizSINR);

figure
hold on
contourf(coordenadax,coordenaday,matrizSINR)
contourf(-coordenadax,coordenaday,matrizSINR)
xlabel('\bfEje en km')
ylabel('\bfEje en km')

```

```

title('\bfSINR')
hold off
axis equal
    %end

%end
figure
plot(conexiones)
xlabel('\bfRadio en km')
ylabel('\bfNúm de usuarios')
title('\bfUsuarios')

toc

%% Código para el Cálculo estimado de Estaciones base
%% Autor: Fernando López Delegido

clc
clear all
close all
warning off

tic
extension = 43;
N=[];
radio2=[];
conexiones = 28302;
contador = 1;
for radio=0.5:0.01:3

    N(contador)= ceil(extension/(2.6*radio*radio));
    estaciones(contador) = 1*ceil(conexiones/(4802*3));
    radio2(contador)=radio;
    contador=contador+1;

end

figure
hold on
plot(radio2,estaciones,'r')
plot(radio2,N)
legend('Cálculo por Conexiones','Cálculo por Extensión',1)
xlabel('\bfRadio en km')
ylabel('\bfNúm de estaciones base')
title('\bfAlcobendas')
hold off

```

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

    dividido(i)=ceil(N(i))/ceil(estaciones(i));
    if dividido(i)<=3
        radio2(i)
        ceil(estaciones(i))
        ceil(N(i))

        break
    else
        end
    end
end

extension_final=2.6*radio2(i)*radio2(i)*(ceil(N(i))+1)
densidad=conexiones/ceil(N(i))
```

B Antenas



Stella Doradus Ireland Ltd.

3.5GHz Netamorphic Solid State Remote Tilt Base Station

Minimized Side-Lobe

Part Number:	33 SD9890MS-V-RET	35 SD9890MS-V-RET	37 SD9890MS-V-RET
	3.3-3.4GHz	3.4 - 3.6GHz	3.6-3.8GHz



The 35 SD9890MS-V-RET Netamorphic antenna is a solid state, remote electrical tilt Vertically Polarized base station antenna with high gain and minimized side lobes designed for use in high density RF environments

Electrical Specification

Gain	16dBi
3dB beam Pattern	90° x 8°
Bandwidth	3.4-3.6GHz
Reflection	-15dB
Front to Back Ratio	30dB
Polarization	Vertical
Power Rating	25W
Impedance	50 ohms
Termination	Fixed N- female
Cross Pol. Discrimination	22dB
Digital Electrical Tilt	1,3,5,7 degrees

Mechanical Specifications

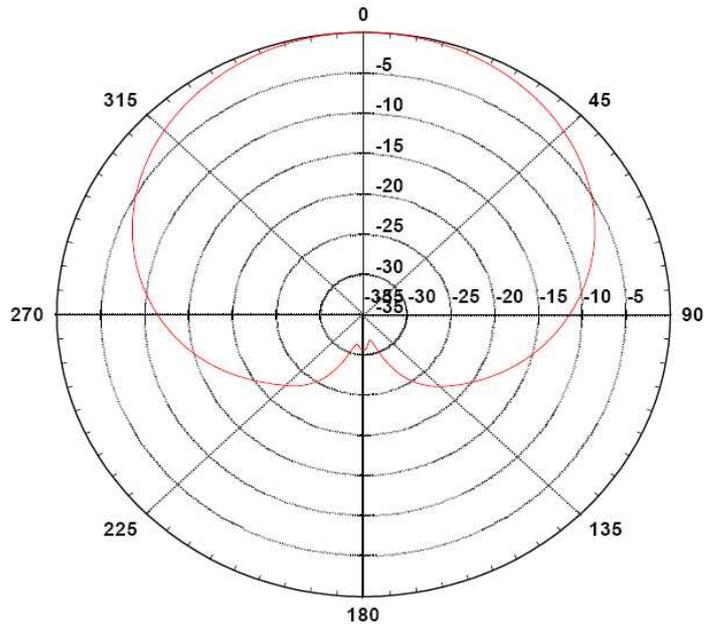
Length	71cm
Width	14cm
Depth	12cm
Weight (excl. brackets)	2.5kg
Windage(at 200kmph)	298N
Mechanical Tilt	0-9 degrees
Mounting Pipe	4 inch pipe

Materials

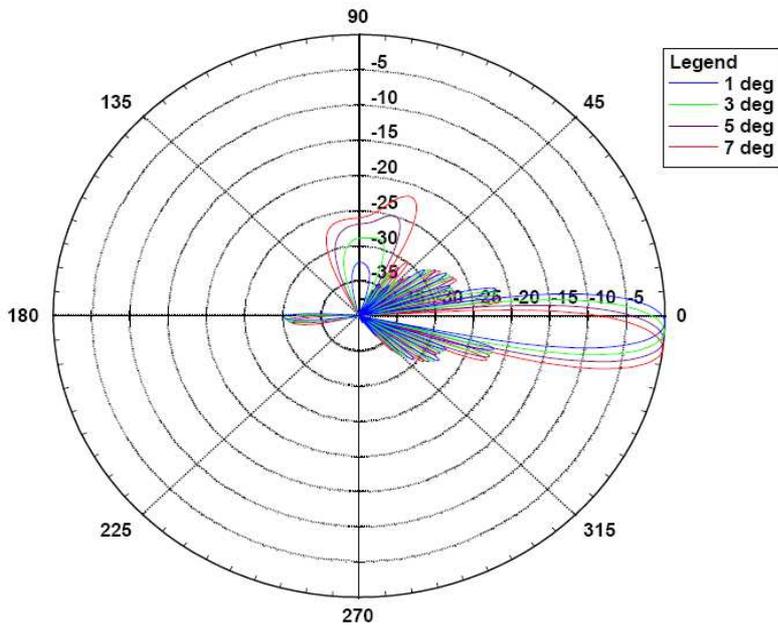
Radiating Element	Beam forming PCB slot array
Radome	Aluminium + ABS Grey
Clamps	HDG steel + stainless steel bolts

Specification subject to change without notice.
Warranty: 2 years from date of shipment from factory, against defects in materials and workmanship.
Please refer to warranty document for full details

Azimuth Pattern



Elevation Pattern



Specification subject to change without notice.
Warranty: 2 years from date of shipment from factory, against defects in materials and workmanship.
Please refer to warranty document for full details

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

- 1000 horas a 15 € / hora..... 15000 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión..... 70 €
- Encuadernación..... 30 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 17300 €

7) I.V.A. aplicable

- 16% Subtotal Presupuesto 2768 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto..... 20068 €

Madrid, Julio de 2009

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Fernando López Delegido
Ingeniero Superior de Telecomunicación

Pliego de Condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de una Red de Acceso de Banda Ancha mediante WiMAX en zonas rurales y costeras. 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 partidaalzada 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.

----- Fin Proyecto -----