

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**Planificación de Sistemas GSM, WCDMA,
INFOSTATIONS y WiMAX en las autopistas**

Esther Pérez Muleiro

Marzo 2010

Planificación de Sistemas GSM, WCDMA, INFOSTATIONS y WiMAX en las autopistas

**AUTOR: Esther Pérez Muleiro
TUTOR: Bazil Taha Ahmed**

Grupo de Radiocomunicaciones y Comunicaciones Ópticas

**Dpto. de Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid**

Marzo 2010

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Bazil Taha Ahmed, el gran apoyo y motivación que me ha dado a lo largo del desarrollo de mi Proyecto Fin de Carrera. Gracias por tu paciencia, por tu disponibilidad y por ser, además de un gran tutor y profesor, una gran persona.

También quiero agradecer a todos los profesores que durante todos estos años, me habéis dado la oportunidad de aprender mucho de vosotros, tanto académicamente, como a crecer como persona. Gracias a Jesús Bescós, Chema Martínez, Javier Aracil, Antonio Aguilar, Luís Herranz, Doroteo Torre, José Luís Masa,... gracias a todos.

Quiero agradecer a todos mis compañeros que he conocido en la universidad que me han ayudado a llegar hasta aquí dejando atrás muchos buenos momentos, risas, y algún que otro momento de estrés... y que espero sigamos compartiendo durante muchos años. Gracias a Nacho, Mario, Nit, Bibis, Imanol,... y muchas más personas con las que me he cruzado a lo largo de estos años, y que dejan en mi memoria muchos buenos momentos. Por supuesto, agradecer a Pablo, Gus, Chus y Kiko por haberme dado la oportunidad de conocerles y de ser mis amigos con todas las letras; gracias por compartir con nosotras estos años inolvidables.

Lo mejor que me llevo de estos años sin lugar a duda son mis niñas! Gracias Ele, porque fuiste la primera persona con la que hablé, mi primera compañera de la carrera,... y a partir de ahí hemos compartido juntas momentos inolvidables cerca... y no tan cerca! Nunca me olvidaré de Dublín, ni de mi primera amiga entre esas 4 paredes entre las que tantas horas hemos pasado. Gracias Sonso, porque no hay nada como tener a alguien como tú cerca para sentirse bien y alegrarte el día! Gracias por tus charlas, por tus ánimos, por tu apoyo, por tu sonrisa, por ser tan buena y cariñosa y por hacerme el día a día mucho más llevadero. Gracias Verito, porque para mí siempre serás mi Verito. Gracias por ser la amiga que todo el mundo querría tener, y gracias por estar siempre ahí y porque sé que siempre seguirás estando (como dice nuestra canción!). Gracias Moni por aguantar mis historietas, por ser como eres, por tus cosquillas!! Jejeje. Por haber compartido conmigo tantos buenos momentos y porque sé que lo seguiremos haciendo. Gracias por quererme tanto y por darme todo tu apoyo siempre. Gracias de verdad a las 4, porque sois las mejores compañeras y, por supuesto, las mejores amigas que hubiera soñado.

También quiero agradecer a mis amigos del “barrio”, porque sin ellos no hubiera sido tan fácil llegar hasta aquí. Gracias al Sefe, Rita, Dani, Thais, Beita, Morty, Alvaro,... y todos los demás navarreros, por todos los buenos ratos que hemos pasado, que me han hecho olvidar todo lo

demás. También me gustaría dedicarle una frase a mi siempre amiga Lara, que aunque “lejos”, siempre la noto a mi lado.

A Adri, porque este camino no hubiera sido lo mismo si no te hubiera tenido a mi lado. Gracias por quererme tanto, y por apoyarme en los peores momentos. Gracias por creer siempre en mi, y por darme todo tu cariño siempre. Esto también es tuyo. Te quiero.

Y por último, quiero agradecer a toda mi familia y en particular a mis tíos Jose, Camilo, Pepita, Feli, Puri, Susa y a mis abuelos Etelvino, Elvira y Esther porque aunque estén lejos, están en mi mente todos los días, y pensar en ellos “e na miña terra” me ha ayudado siempre a seguir adelante. Gracias a mi hermana Paulita, porque aunque lo nuestro sea un amor-odio, la quiero con locura y sé que siempre estaremos ahí la una para la otra.

Y por supuesto, quiero darle las gracias infinitas y dedicar este proyecto a mis padres Paco y Elvira, por quererme más que nadie, por apoyarme y ayudarme en todo, por ser los mejores padres que se puede tener y porque sin vosotros, nada de esto hubiera sido posible.

Gracias a todos por haberme ayudado a llegar hasta aquí.

Esther.

Resumen:

El objetivo de este proyecto es el estudio de las prestaciones de los Sistemas GSM, WCDMA, INFOSTATIONS y WiMAX en el ámbito de las autopistas. Debido al aumento del número de usuarios que utilizan los sistemas móviles, existe una gran necesidad de tener una buena infraestructura de telecomunicaciones que dé los mejores resultados posibles, esté donde esté el usuario.

Por ello, se va a realizar un exhaustivo estudio teórico que proporcionará unos resultados numéricos de la capacidad o la cobertura de dichos sistemas, los cuales ayudarán a sacar conclusiones del uso de los mismos en implementaciones reales.

Palabras clave:

- GSM
- WCDMA
- INFOSTATIONS
- WiMAX
- Capacidad
- Cobertura
- SNIR

Abstract:

The objective of this project is to study the performance of GSM, WCDMA, WiMAX and INFOSTATIONS in highways. Due to increment of the number of users who use mobile systems, there is great need for a telecommunications infrastructure that gives the best results possible, no matter where is the user.

Therefore, we will conduct a exhaustive study that will give us some numerical results of the capacity or coverage of these systems, and help us to draw conclusions that can be used in real implementations.

Keywords:

- GSM
- WCDMA
- INFOSTATIONS
- WiMAX
- Capacity
- Coverage
- SNIR

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Sistemas GSM en autopistas	4
2.1	Introducción a GSM.....	4
2.1.1	Especificaciones del sistema GSM.....	5
2.1.2	Servicios de telecomunicación GSM.....	9
2.2	La cobertura en GSM.....	11
2.2.1	Modelo de propagación	11
2.2.2	Análisis del enlace descendente.....	13
2.2.3	Resultados de la cobertura del enlace descendente	18
2.2.3.1	<i>Influencia del número de bandas de frecuencia en la distancia máxima</i>	<i>19</i>
2.2.3.2	<i>Cuatro bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros</i>	<i>21</i>
2.2.3.3	<i>Seis bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros</i>	<i>32</i>
2.3	Conclusiones de GSM.....	40
3	Sistemas UMTS en autopistas.....	43
3.1	Introducción de WCDMA.....	43
3.1.1	Los sistemas móviles	44
3.1.2	Acceso múltiple CDMA	45
3.1.2.1	<i>Limitación por interferencia en CDMA</i>	<i>46</i>
3.1.2.2	<i>Capacidad de los sistemas CDMA</i>	<i>46</i>
3.1.3	El control de potencia	48
3.1.4	Bandas de frecuencia de WCDMA.....	49
3.2	Modelo de Propagación.....	50
3.3	La capacidad del enlace ascendente.....	52
3.3.1	Introducción al enlace ascendente en WCDMA.....	52
3.3.2	Análisis del enlace ascendente.....	55
3.3.3	Resultados de la capacidad del enlace ascendente de WCDMA.....	64
3.3.3.1	<i>Capacidad del sistema con R=1Km para todos los sectores</i>	<i>65</i>
3.3.3.2	<i>Capacidad del sistema variando R para cada sector.....</i>	<i>68</i>
3.3.3.3	<i>Influencia de los parámetros en la capacidad</i>	<i>74</i>
3.4	La capacidad del enlace descendente.....	91
3.4.1	Introducción al enlace descendente de WCDMA.....	91
3.4.2	Análisis del enlace descendente de WCDMA.....	92
3.4.3	Resultados del enlace descendente de WCDMA.....	97
3.4.3.1	<i>Influencia de los parámetros en la capacidad</i>	<i>99</i>
3.5	Conclusiones de WCDMA	103

4 Sistemas INFOSTATIONS en autopistas	105
4.1 Introducción de Infostations.....	105
4.1.1 Enfoque.....	106
4.2 La cobertura en Infostations	108
4.2.1 Modelo de propagación	110
4.2.2 Análisis de la cobertura en Infostation	112
4.2.3 Resultados de la cobertura de Infostations	117
4.2.3.1 <i>Influencia del número de bandas de frecuencia en la distancia máxima</i>	<i>118</i>
4.2.3.2 <i>Influencia del orden de modulación en la distancia máxima..</i>	<i>120</i>
4.2.3.3 <i>Dos bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros.....</i>	<i>122</i>
4.2.3.4 <i>Cuatro bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros..</i>	<i>131</i>
4.2.3.5 <i>Seis bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros.....</i>	<i>139</i>
4.3 Conclusiones de Infostations.....	146
5 Sistemas WiMAX en autopistas	150
5.1 Introducción de WiMAX	150
5.1.1 Especificaciones	152
5.1.2 Características Principales	152
5.2 La cobertura en WiMAX.....	154
5.2.1 El Modelo de Propagación.....	154
5.2.2 Análisis de la cobertura del enlace descendente.....	156
5.2.3 Resultados de la cobertura de WiMAX.....	161
5.2.3.1 <i>Influencia del número de bandas de frecuencia en la distancia máxima</i>	<i>162</i>
5.2.3.2 <i>Influencia del orden de modulación en la distancia máxima..</i>	<i>164</i>
5.2.3.3 <i>Dos bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros.....</i>	<i>166</i>
5.2.3.4 <i>Cuatro bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros..</i>	<i>176</i>
5.2.3.5 <i>Seis bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros.....</i>	<i>185</i>
5.3 Conclusiones de WiMAX	194
6 Conclusión final y trabajo futuro	198
6.1 Trabajo futuro	199
Publicaciones	I
Referencias.....	II
Bibliografía	III
Glosario.....	V
Anexo.....	VI
Anexo A: Contenido de la publicación	VII

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: MODELO BASADO EN LA PROPAGACIÓN SOBRE LA TIERRA PLANA. DOS TRAMOS, CADA UNO CON UN EXPONENTE DE PROPAGACIÓN.....	11
FIGURA 2-2: MODELO DE LAS ESTACIONES BASES EN GSM DE 8 CELDAS EN FORMA DE CIGARRO	13
FIGURA 2-3: DIAGRAMA HORIZONTAL DE RADIACIÓN DE LAS DOS ANTENAS DIRECCIONALES USADAS EN CADA ESTACIÓN BASE.....	13
FIGURA 2-4: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL ESCENARIO DE GSM CON UN USUARIO MÓVIL EN CELDAS DE AUTOPISTAS	14
FIGURA 2-5: SINR DEPENDIENDO DEL NÚMERO DE BANDAS DE FRECUENCIA	19
FIGURA 2-6: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE C_{DO} PARA 2 BANDAS DE FRECUENCIA.....	20
FIGURA 2-7: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	21
FIGURA 2-8: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	22
FIGURA 2-9: SIR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	22
FIGURA 2-10: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	23
FIGURA 2-11: SIR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	24
FIGURA 2-12: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	24
FIGURA 2-13: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	25
FIGURA 2-14: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_2	26
FIGURA 2-15: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA CORRELACIÓN (C_{DO}).....	26
FIGURA 2-16: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA	27
FIGURA 2-17: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE R (2R ES LA DISTANCIA ENTRE LAS ESTACIONES BASE)	28
FIGURA 2-18: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	29
FIGURA 2-19: SIR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	30
FIGURA 2-20: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	30
FIGURA 2-21: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	32
FIGURA 2-22: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	33
FIGURA 2-23: SIR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	34

FIGURA 2-24: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	34
FIGURA 2-25: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	35
FIGURA 2-26: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_2	36
FIGURA 2-27: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA CORRELACIÓN (C_{DO}).....	37
FIGURA 2-28: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA	37
FIGURA 2-29: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE R (2R ES LA DISTANCIA ENTRE LAS ESTACIONES BASE)	38
FIGURA 2-30: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	39
FIGURA 3-1: MODELO BASADO EN LA PROPAGACIÓN SOBRE LA TIERRA PLANA. DOS TRAMOS, CADA UNO CON UN EXPONENTE DE PROPAGACIÓN.....	50
FIGURA 3-2: MODELO DE 5 MICROCELDA	55
FIGURA 3-3: MICROCELDA “D” A LA QUE GENERARÁ INTERFERENCIA Y MICROCELDA “M” CON LA QUE ESTABLECERÁ COMUNICACIÓN.....	55
FIGURA 3-4: EJEMPLO DE AUTOVÍA DONDE SE PUEDE LLEVAR A CABO EL ESTUDIO	58
FIGURA 3-5: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ CON R FIJO A 1KM	66
FIGURA 3-6: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS CON R FIJO A 1KM	67
FIGURA 3-7: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ + DATOS CON R FIJO A 1KM.....	67
FIGURA 3-8: SITUACIÓN DEL ESCENARIO, TENIENDO UN R DIFERENTE PARA CADA SECTOR.....	68
FIGURA 3-9: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ CON RANGO DE LOS SECTORES DIFERENTES.....	69
FIGURA 3-10: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ CON RANGO DE LOS SECTORES GRANDE.....	70
FIGURA 3-11: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS CON RANGO DE LOS SECTORES DIFERENTES...	71
FIGURA 3-12: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS CON RANGO DE LOS SECTORES GRANDE.....	72
FIGURA 3-13: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ + DATOS CON RANGO DE LOS SECTORES DIFERENTES	72
FIGURA 3-14: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ + DATOS CON RANGO DE LOS SECTORES GRANDE	73
FIGURA 3-15: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ PARA DIFERENTES VALORES DE R(M).....	74
FIGURA 3-16: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE R(M).....	75
FIGURA 3-17: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ + DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE R(M) .	76

FIGURA 3-18: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ PARA DIFERENTES VALORES DE $R_B(M)$	77
FIGURA 3-19: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE $R_B(M)$	78
FIGURA 3-20: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ + DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE $R_B(M)$	78
FIGURA 3-21: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ PARA DIFERENTES VALORES DE S_1	79
FIGURA 3-22: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE S_1	80
FIGURA 3-23: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ + 5 DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE S_1	81
FIGURA 3-24: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ PARA DIFERENTES VALORES DE S_2	82
FIGURA 3-25: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE S_2	83
FIGURA 3-26: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ + 5 USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE S_2	83
FIGURA 3-27: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ PARA DIFERENTES VALORES DE SLL	84
FIGURA 3-28: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE SLL	85
FIGURA 3-29: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ + 5 USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE SLL	86
FIGURA 3-30: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ PARA DIFERENTES VALORES DE C_{DM}	87
FIGURA 3-31: CAPACIDAD DE USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE C_{DM}	88
FIGURA 3-32: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ Y 5 USUARIOS DE DATOS PARA DIFERENTES VALORES DE C_{DM}	89
FIGURA 3-33: CAPACIDAD DE USUARIOS DE VOZ VARIANDO EL NÚMERO DE USUARIOS DE DATOS	89
FIGURA 3-34: MODELO DE LAS ESTACIONES BASES EN WCDMA DE 8 CELDAS EN FORMA DE CIGARRO	93
FIGURA 3-35: DIAGRAMA HORIZONTAL DE RADIACIÓN DE LAS DOS ANTENAS DIRECCIONALES USADAS EN CADA ESTACIÓN BASE.....	93
FIGURA 3-36: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL ESCENARIO DE GSM CON UN USUARIO MÓVIL EN CELDAS DE AUTOPISTAS	93
FIGURA 4-1: MODELO BASADO EN LA PROPAGACIÓN SOBRE LA TIERRA PLANA. DOS TRAMOS, CADA UNO CON UN EXPONENTE DE PROPAGACIÓN.....	110
FIGURA 4-2: MODELO DE INFOSTATION DE 8 CELDAS EN FORMA DE CIGARRO	112
FIGURA 4-3: DIAGRAMA HORIZONTAL DE RADIACIÓN DE LAS DOS ANTENAS DIRECCIONALES USADAS EN CADA INFOSTATION	112

FIGURA 4-4: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL ESCENARIO INFOSTATION CON UN USUARIO MÓVIL EN CELDAS DE AUTOPISTAS	113
FIGURA 4-5: SINR DEPENDIENDO DEL NÚMERO DE BANDAS DE FRECUENCIA	118
FIGURA 4-6: DISTANCIA MÁXIMA A LA QUE PUEDE SITUARSE EL USUARIO DE LA ESTACIÓN BASE PARA CADA ORDEN DE MODULACIÓN EN EL CASO DE 2 BANDAS DE FRECUENCIA	120
FIGURA 4-7: DISTANCIA MÁXIMA A LA QUE PUEDE SITUARSE EL USUARIO DE LA ESTACIÓN BASE PARA CADA ORDEN DE MODULACIÓN EN EL CASO DE 4 BANDAS DE FRECUENCIA	120
FIGURA 4-8: DISTANCIA MÁXIMA A LA QUE PUEDE SITUARSE EL USUARIO DE LA ESTACIÓN BASE PARA CADA ORDEN DE MODULACIÓN EN EL CASO DE 6 BANDAS DE FRECUENCIA	121
FIGURA 4-9: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	122
FIGURA 4-10: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	123
FIGURA 4-11: SIR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	124
FIGURA 4-12: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	124
FIGURA 4-13: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	124
FIGURA 4-14: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_2	125
FIGURA 4-15: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA CORRELACIÓN (C_{DO})	126
FIGURA 4-16: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA	127
FIGURA 4-17: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE R (2R ES LA DISTANCIA ENTRE LAS INFOSTATION)	128
FIGURA 4-18: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	129
FIGURA 4-19: SIR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	130
FIGURA 4-20: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	130
FIGURA 4-21: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	131
FIGURA 4-22: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	132
FIGURA 4-23: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	132
FIGURA 4-24: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_2	133
FIGURA 4-25: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA CORRELACIÓN (C_{DO})	134
FIGURA 4-26: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA	135

FIGURA 4-27: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE R (2R ES LA DISTANCIA ENTRE LAS INFOSTATION)	135
FIGURA 4-28: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	136
FIGURA 4-29: SIR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	137
FIGURA 4-30: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	138
FIGURA 4-31: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	139
FIGURA 4-32: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	140
FIGURA 4-33: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	140
FIGURA 4-34: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_2	141
FIGURA 4-35: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA CORRELACIÓN (C_{Do})	142
FIGURA 4-36: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA	143
FIGURA 4-37: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE R (2R ES LA DISTANCIA ENTRE LAS INFOSTATION)	144
FIGURA 4-38: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	145
FIGURA 5-1: MODELO BASADO EN LA PROPAGACIÓN SOBRE LA TIERRA PLANA. DOS TRAMOS, CADA UNO CON UN EXPONENTE DE PROPAGACIÓN	154
FIGURA 5-2: MODELO DE WiMAX DE 8 CELDAS EN FORMA DE CIGARRO	156
FIGURA 5-3: DIAGRAMA HORIZONTAL DE RADIACIÓN DE LAS DOS ANTENAS DIRECCIONALES USADAS EN CADA ESTACIÓN WiMAX	156
FIGURA 5-4: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL ESCENARIO DE WiMAX CON UN USUARIO MÓVIL EN CELDAS DE AUTOPISTAS	157
FIGURA 5-5: SINR DEPENDIENDO DEL NÚMERO DE BANDAS DE FRECUENCIA	163
FIGURA 5-6: DISTANCIA MÁXIMA A LA QUE PUEDE SITUARSE EL USUARIO DE LA ESTACIÓN BASE PARA CADA ORDEN DE MODULACIÓN EN EL CASO DE 2 BANDAS DE FRECUENCIA	164
FIGURA 5-7: DISTANCIA MÁXIMA A LA QUE PUEDE SITUARSE EL USUARIO DE LA ESTACIÓN BASE PARA CADA ORDEN DE MODULACIÓN EN EL CASO DE 4 BANDAS DE FRECUENCIA	164
FIGURA 5-8: DISTANCIA MÁXIMA A LA QUE PUEDE SITUARSE EL USUARIO DE LA ESTACIÓN BASE PARA CADA ORDEN DE MODULACIÓN EN EL CASO DE 6 BANDAS DE FRECUENCIA	165
FIGURA 5-9: DISTANCIA MÁXIMA A LA QUE PUEDE SITUARSE EL USUARIO DE LA ESTACIÓN BASE PARA CADA ORDEN DE MODULACIÓN	165
FIGURA 5-10: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	166

FIGURA 5-11: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	167
FIGURA 5-12: SIR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	168
FIGURA 5-13: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	168
FIGURA 5-14: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	169
FIGURA 5-15: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_2	170
FIGURA 5-16: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA CORRELACIÓN (C_{DO})	171
FIGURA 5-17: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA Y FIJANDO LA ALTURA DE LA ANTENA DE LA ESTACIÓN BASE A 10 METROS	171
FIGURA 5-18: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA Y FIJANDO EL PARÁMETRO R_B A 340 METROS	173
FIGURA 5-19: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE R ($2R$ ES LA DISTANCIA ENTRE LAS ESTACIONES BASE)	174
FIGURA 5-20: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	175
FIGURA 5-21: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	176
FIGURA 5-22: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	177
FIGURA 5-23: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	178
FIGURA 5-24: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	179
FIGURA 5-25: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_2	179
FIGURA 5-26: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA CORRELACIÓN (C_{DO})	180
FIGURA 5-27: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA Y FIJANDO LA ALTURA DE LA ANTENA DE LA ESTACIÓN BASE A 10 METROS	181
FIGURA 5-28: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA Y FIJANDO EL PARÁMETRO R_B A 340 METROS	182
FIGURA 5-29: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE R ($2R$ ES LA DISTANCIA ENTRE LAS ESTACIONES BASE)	183
FIGURA 5-30: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	184
FIGURA 5-31: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_1	185
FIGURA 5-32: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE S_2	186
FIGURA 5-33: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	187

Índice de figuras

FIGURA 5-34: SNR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_1	188
FIGURA 5-35: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE Σ_2	188
FIGURA 5-36: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA CORRELACIÓN (CDO).....	189
FIGURA 5-37: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA Y FIJANDO LA ALTURA DE LA ANTENA DE LA ESTACIÓN BASE A 10 METROS	190
FIGURA 5-38: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FRECUENCIA Y FIJANDO EL PARÁMETRO R_B A 340 METROS	191
FIGURA 5-39: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE R (2R ES LA DISTANCIA ENTRE LAS ESTACIONES BASE)	192
FIGURA 5-40: SINR DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN	193

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1. VALOR DE LOS PARÁMETROS PARA GSM.....	18
TABLA 3-1. VALORES DE LOS PARÁMETROS PARA EL ENLACE ASCENDENTE DE WCDMA.....	64
TABLA 3-2: VALORES DE LOS PARÁMETROS PARA EL ENLACE DESCENDENTE DE WCDMA.....	97
TABLA 3-3: CAPACIDAD DEL SECTOR	98
TABLA 3-4: VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO s_1	99
TABLA 3-5: VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO s_2	99
TABLA 3-6: VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO Σ_1	100
TABLA 3-7: VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO Σ_2	100
TABLA 3-8: VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO C_{DO}	101
TABLA 3-9: VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO P_T	101
TABLA 3-10: VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD EN FUNCIÓN DEL PARÁMETRO R_B	102
TABLA 4-1. VALORES DE LOS PARÁMETROS PARA INFOSTATION.....	117
TABLA 4-2. ESQUEMAS DE MODULACIÓN Y SU ASOCIACIÓN CON EL SINR.....	117
TABLA 5-1. ESPECIFICACIONES DE WiMAX.....	152
TABLA 5-2. VALOR DE LOS PARÁMETROS.....	161
TABLA 5-3. SINR REQUERIDO EN FUNCIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MODULACIÓN PARA WiMAX	162

1 Introducción

Este Proyecto Fin de Carrera parte de la necesidad de que los usuarios de las autopistas puedan disfrutar de los servicios de telecomunicaciones proporcionados por los sistemas GSM, WCDMA, Infostations y WiMAX.

Para realizar la planificación de los sistemas de telecomunicación en las autopistas, se va a hacer un estudio teórico de las prestaciones de dichos sistemas así como los requisitos necesarios para desplegarlos en el entorno de las autopistas.

1.1 Motivación

Se parte de la idea de que para que una economía funcione, se necesita una adecuada infraestructura; se necesitan carreteras y autopistas que conecten los centros de materias primas con los de producción y consumo, así como una infraestructura de energía que permita distribuir la electricidad desde las centrales termo-eléctricas e hidroeléctricas hasta las ciudades y zonas industriales.

A su vez, es necesario una infraestructura de telecomunicaciones (teléfono, fax, radio, televisión, Internet) que permita producir, circular y utilizar la información y los conocimientos que se requieren, sobre todo en esta época en la que las actividades económicas, sociales y políticas se hacen cada vez más intensivas en el uso de los mismos. Igualmente hacen falta puertos y aeropuertos, líneas ferroviarias reforzadas con sistemas de transporte descentralizados a través de camiones.

Por todo ello, las infraestructuras de comunicación como pueden ser las autopistas, son utilizadas diariamente por miles de personas, que debido a la sociedad moderna en la que vivimos, necesitan de las telecomunicaciones allí donde estén.

Es por esto, por lo que cada vez se hace más importante un buen servicio de telecomunicaciones en las infraestructuras de comunicación (carreteras, autopistas,...), que den al usuario la oportunidad de utilizar cualquier servicio de telecomunicaciones, como puede ser llamadas desde un Móvil, Sms, Internet,... estén donde estén. Por todo ello, se están realizando numerosos estudios y avances en las tecnologías móviles.

En este PFC, se va a contribuir a esta necesidad de crear una buena infraestructura de telecomunicaciones, y se va a realizar un profundo estudio teórico de las diferentes tecnologías de telefonía móvil, como son GSM, WCDMA, Infostations y WiMAX, y con este estudio, se extraerán unos resultados que se podrán utilizar a la hora de realizar una implementación real.

1.2 Objetivos

En este proyecto se van a analizar los sistemas GSM, CDMA, WCDMA, Infostations y WiMAX, mediante los cuales los usuarios de las autopistas pueden disfrutar de diferentes servicios de telecomunicaciones.

Para planificar los sistemas de telecomunicación en las autopistas, se necesita un estudio teórico de las prestaciones de dichos sistemas. A partir de este estudio teórico, se obtendrán unos resultados numéricos, que nos darán una idea de cómo será una implementación real de cada uno de estos sistemas, y cuales serán sus prestaciones.

El objeto de este Proyecto Fin de Carrera es, en resumen, la profundización en el cálculo de la capacidad de los sistemas de telecomunicación móviles que usan WCDMA cuando trabajan para dar cobertura a los usuarios de las autopistas que se encuentran dentro de los coches o autobuses. Además, se estudian las prestaciones que tienen los sistemas GSM, Infostations y WiMAX en las autopistas, y los requisitos para desplegar dichos sistemas.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1:** Introducción, motivación y objetivos del proyecto.
- **Capítulo 2:** En este capítulo se estudian las prestaciones y la cobertura del sistema GSM. Se realiza un estudio teórico, y se dan resultados que pueden servir como base en una implementación real.

- **Capítulo 3:** En este capítulo se estudia la capacidad del enlace ascendente y descendente de WCDMA. Se realiza un estudio teórico, y se dan resultados que pueden servir en una implementación real.
- **Capítulo 4:** En este capítulo se estudian las prestaciones de Infostation. Se realiza un estudio teórico, y se dan unos resultados que pueden servir como base en una implementación real.
- **Capítulo 5:** En este capítulo se estudian las prestaciones y la cobertura del sistema WiMAX. Se realiza un estudio teórico, y se dan resultados que pueden servir como base en una implementación real.
- **Capítulo 6:** Conclusiones finales y trabajo futuro.

2 Sistemas GSM en autopistas

En este capítulo se va a analizar el sistema de comunicaciones móviles GSM. Después de una breve introducción acerca de esta tecnología y de los conceptos claves necesarios para la comprensión del posterior análisis, se va a definir el modelo de propagación y se va a realizar un profundo estudio teórico de la cobertura de GSM, sacando conclusiones reales a partir del análisis teórico.

2.1 Introducción a GSM

El Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, proviene de "Groupe Special Mobile") es un sistema estándar, completamente definido, para la comunicación mediante teléfonos móviles que incorporan tecnología digital. Por ser digital, cualquier cliente de GSM puede conectarse a través de su teléfono con su ordenador y puede acceder a diferentes servicios como pueden ser: enviar y recibir mensajes por e-mail, faxes, navegar por Internet, tener acceso seguro a la red informática de una compañía (LAN/Intranet), así como utilizar otras funciones digitales de transmisión de datos, incluyendo el Servicio de Mensajes Cortos (SMS) o mensajes de texto.

Debido a la necesidad de la utilización de una norma universal que permitiera a los usuarios realizar llamadas desde cualquier país, con un abaratamiento de los precios y una mayor liberalización de las comunicaciones móviles, la Comunidad Europea formó el llamado "Groupe Speciale Mobile" (GSM), para preparar un estándar de un sistema de telefonía móvil público destinado al mercado potencial europeo, incrementando el protagonismo de los usuarios y utilizando una tecnología que proporcionase una gran capacidad con un grado de calidad adecuado.

Esta norma a desarrollar, debería especificar una PLMN (Public land mobile network), con unas interfaces básicas entre las unidades funcionales del futuro sistema, de forma que pudieran construirse las redes con equipos de diferentes fabricantes (interoperabilidad). Además, se debería dejar las puertas abiertas para que éstos pudieran ofrecer prestaciones adicionales.

El grupo GSM definió una serie de requisitos básicos para el nuevo sistema, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Itinerancia internacional, dentro de los países de la UE
- Tecnología digital.
- Gran capacidad de tráfico.
- Utilización eficiente del espectro radioeléctrico.
- Sistema de señalización digital.
- Servicios básicos de voz y datos.
- Amplia variedad de servicios telemáticos.
- Posibilidad de conexión con la ISDN (Integrated Services Digital Network).
- Seguridad y privacidad en la interfaz radio, con protección de la identidad de los usuarios y la encriptación de sus transmisiones.
- Utilización de teléfonos portátiles.
- Calidades altas de cobertura, tráfico y señal recibida.

2.1.1 Especificaciones del sistema GSM

- Bandas de frecuencia

1. Banda de 900 MHz:

- Transmisión estación móvil (Uplink): 830-915 MHz
- Transmisión estación base (Downlink): 935-960 MHz

2. Banda de 1800 MHz:

- Transmisión estación móvil (Uplink): 1.710-1.785 MHz
- Transmisión estación base (Downlink): 1.805-1.880 MHz

- Separación dúplex

- Banda de 900 MHz: 45 MHz
- Banda de 1800 MHz: 95 MHz

- Separación de canales

- 200 KHz, que proporcionan un valor mínimo de selectividad de canal RF adyacente dentro del sistema igual a 18dB. Los valores correspondientes a los segundos y terceros canales son, respectivamente, 50 dB y 58 dB como mínimo.

- **Modulación**
 - La modulación es GMSK con $B_bT=0.3$ y velocidad de modulación 270.83 kbit/s en RF, con un rendimiento espectral aproximado de 1bits/s/Hz.

- **Relación de protección**
 - La relación de protección cocanal es $R_p = 11$ dB.

- **Retardo compensable máximo**
 - 223 μ s. Por ello, el R_{max} es de aproximadamente 34Km.

- **Dispersión Doppler**
 - Puede compensarse la dispersión Doppler del canal hasta velocidades del móvil de 200km/h.

- **PIRE máxima de la estación base**
 - 500 W por portadora.

- **Dispersión temporal**
 - Puede ecualizarse una dispersión temporal de 16 μ s como máximo.

- **Codificación de canal**
 - Se utiliza un código bloque detector y un código convolucional corrector de errores, con entrelazado de bits para combatir las ráfagas de errores.

- **Potencia nominal de las estaciones móviles**
 - Hay diversos tipos de estaciones, con potencias máximas de 2, 5, 8 y 20 W.

- **Estructura celular y reutilización**
 - La estructura celular es sectorizada, de tipo 3/9 o 4/12 en medios urbanos. En medios rurales las células son omnidireccionales. El radio celular varía entre un máximo de 3.5km en zonas rurales y unos 0.5km en zonas urbanas.

- **Acceso múltiple**
 - Se utiliza TDMA con 8 intervalos de tiempo por trama. La duración de cada intervalo es de 0.577ms. La trama comprende 8 canales físicos que transportan los canales lógicos de

tráfico y señalización. Se han establecido estructuras de multitrama para señalización por canal común.

- **Canales de tráfico**

- Canal de tráfico para voz: se han definido canales de velocidad total y velocidad mitad, para los cuales el codec vocal proporciona señales de 13kbit/s y 6.5kbit/s respectivamente.
- Canal de tráfico para datos: se sustentan servicios de datos de tipo transparente a velocidades de 2.4, 4.8 y 9.6 kbit/s con diferentes procedimientos de adaptación de velocidad, codificación de canal y entrelazado. Se admiten servicios de datos de naturaleza no transparente con una velocidad neta de 12kbit/s y servicios de conmutación de paquetes con velocidades comprendidas entre 8 y 20kbit/s.

- **Canales de control**

- Se han establecidos tres categorías de canales de control: difusión, comunes y dedicados.

- **Facilidades radio**

Las potencias de transmisión del móvil y de la base se regulan mediante algoritmos de control de potencia, de forma que sus valores son los estrictamente necesarios para asegurar una determinada calidad de conexión. Ello conlleva una reducción de la interferencia y del riesgo de uso de los equipos.

Bajo mandato de la red, los móviles pueden efectuar sus transmisiones cambiando de frecuencia de una trama a otra. A esta modalidad de funcionamiento se le llama saltos de frecuencia FH. Se consigue así una mejora de la calidad ya que FH produce un efecto similar al de la diversidad de frecuencia, y además, reduce el número de fuentes de interferencia.

Puede también utilizarse la técnica de transmisión discontinua (DTX) con la que únicamente hay emisión de señal RF cuando el usuario está hablando. De esta forma se reduce el nivel de interferencia y se prolonga la duración de la batería. También es posible la recepción discontinua (DRX) gracias a la cual el receptor móvil puede alternar períodos de reposo y escucha, lo que también aumenta la duración de la batería.

- **Reselección de célula**

En situación de reposo el móvil está vinculado a una célula, de forma que puede interpretar con una gran fiabilidad las señales de control del enlace descendente, y asimismo con gran probabilidad, establecer una comunicación por el enlace ascendente. La condición para efectuar una reelección de célula se basa en criterios de pérdida de propagación. Si se rebasa el umbral

de pérdida, o si el móvil es incapaz de decodificar los bloques de control o de efectuar el acceso a la estación base, inicial el proceso de reelección.

- **Localización automática**

Se efectúa mediante la evaluación, por parte del móvil, de la señal de control y la devolución de su identidad a la red. La localización automática debe ser posible entre los centros de conmutación del servicio móvil (MSC) de cada país, y entre países.

- **Traspaso**

El traspaso asegura la continuidad de una comunicación cuando el móvil pasa de la zona de cobertura de una célula a otra. Puede también emplearse para aliviar una congestión de tráfico (traspaso gobernado por la red). El traspaso puede hacerse entre una canal de una célula y otro de una adyacente o entre canales de una misma célula. La estrategia de traspaso se basa en el control del enlace mediante mediciones efectuadas por las estaciones móviles y la base. El móvil supervisa el nivel y calidad de la señal descendente enviada por la estación base que la atiende, así como de las células vecinas. La estación base supervisa el nivel y calidad de la señal ascendente para cada móvil. Las mediciones de nivel se utilizan también para el control de la potencia RF.

- **Señalización**

La señalización entre las estaciones base y los MSC sigue un procedimiento estructurado similar al de la ISDN. Entre los MSC se utiliza el Sistema de Señalización num. 7 del UIT-T.

- **Numeración**

El plan de numeración es conforme con las Recomendaciones de la Serie E del UIT-T.

- **Seguridad**

Se han establecido una técnica de cifrado para las comunicaciones de voz y datos, así como un complejo sistema de autenticación para el acceso al sistema por parte de los terminales.

2.1.2 Servicios de telecomunicación GSM

GSM se concibe como un sistema multiservicio. Las especificaciones se realizaron siguiendo conceptos de servicios ISDN, por lo que los servicios que ofrece GSM se clasifican en: servicios portadores y teleservicios.

Los servicios portadores se establecen entre terminaciones de red en ambos extremos y ofrecen al usuario una capacidad de transporte independiente del contenido de la información, con diversas modalidades de funcionamiento que se especifican mediante los siguientes atributos:

- De transferencia de información:
 - Tipo (voz y datos).
 - Modo (conmutación de circuitos o de paquetes).
 - Velocidad de datos (300-9.600bit/s).
 - Direccionalidad (simplex, dúplex).
- De acceso:
 - Protocolo (manual, series de recomendaciones del UIT-T).
 - Tipo de interfaz.
 - Velocidad de datos en el punto de acceso.
- De interfuncionamiento:
 - Tipo de red de destino (PSTN, ISDN, PLMN).
 - Interfaz terminal-red.
- Generales:
 - Servicios suplementarios anexos al servicio básico.
 - Calidad de servicio.

En la Recomendación GSM 02.02, se especifican diversos tipos de portadoras cuyas características generales son: datos síncronos/asíncronos con conmutación de circuitos; acceso a funciones de empaquetado/desempaquetado PAD para datos asíncronos; acceso a redes públicas de paquetes X.25 para datos asíncronos a 2.400-9.600bit/s; conmutación voz/datos durante una llamada en forma alternada voz/datos o voz seguida de datos; sustentación de técnicas de retransmisión automática ARQ para mejora de la tasa de errores en modo no transparente.

Los teleservicios son servicios de telecomunicación que proporcionan una capacidad completa de conmutación entre los usuarios, incluidas funciones de terminal. Permiten también el acceso del usuario a algunas funciones de la red, como el almacenamiento y tratamiento de mensajes. En GSM se ofrecen, entre otros, los siguientes:

- Telefonía con voz digitalizada a velocidades de 13kbit/s. Se incluyen llamadas de emergencia.
- Mensajes cortos SMS: envío y recepción de hasta 160 caracteres a través de un centro de control.
- Almacenamiento y tratamiento de mensajes no atendidos, por estar el teléfono móvil desconectado o fuera de cobertura.
- Mensajería multimedia MMS, que permite la transmisión de mensajes de voz, texto e imágenes fijas y móviles.

2.2 La cobertura en GSM

En este apartado, se va a ver el modelo de propagación que se utiliza, y cual es el desarrollo teórico para el cálculo de la cobertura del enlace descendente de GSM. A partir de esto, se van a dar unos resultados numéricos de la cobertura que tiene GSM en diferentes escenarios.

2.2.1 Modelo de propagación

Para calcular las pérdidas de propagación en autopistas en la tecnología GSM, usaremos un modelo de propagación sobre la tierra plana en el que están presentes dos exponentes de propagación diferentes para cada uno de los dos tramos (Figura 2.1). Para cada tramo, se dará el valor medio de las pérdidas de propagación más el efecto de shadowing, que se presenta por una distribución Log-normal.

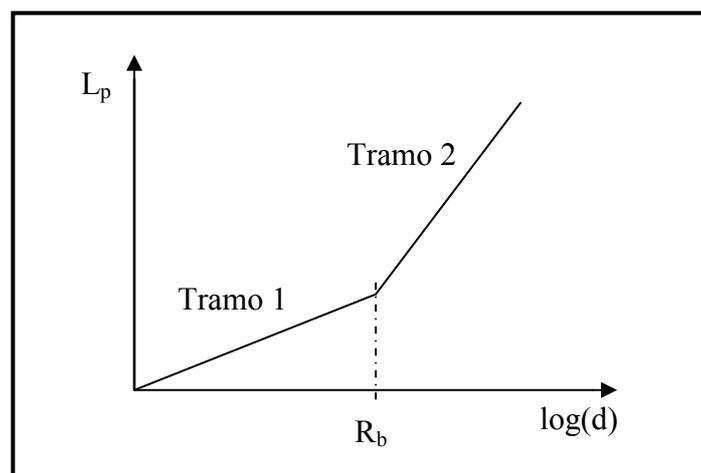


Figura 2-1: Modelo basado en la propagación sobre la tierra plana. Dos tramos, cada uno con un exponente de propagación

Se asume que el exponente de las pérdidas de propagación es s_1 hasta el punto de ruptura (a una distancia R_b), y a partir de él, el exponente de propagación cambia a un valor mayor determinado por el parámetro s_2 .

Por ello, las pérdidas de propagación entre una estación GSM y un usuario móvil vienen dadas por [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_p (dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \xi_1, \text{ si } r \leq R_b \\ L_p (dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \xi_2, \text{ si } r > R_b \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_p (dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \xi_2, \text{ si } r > R_b \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Donde:

- L_g , son las pérdidas de penetración por las ventanas de los automóviles (son cero si el usuario esta fuera del coche)
- r , es la distancia entre la estación GSM base y el usuario móvil
- ξ_1 y ξ_2 , son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar σ_1 y σ_2 respectivamente, y representan el efecto del shadowing
- L_b , pérdidas básicas de propagación, vienen dadas por:

$$L_b (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10s_1 \log_{10} (R_b) \quad (2.3)$$

- R_b , distancia del punto de corte, viene dado por:

$$R_b \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda} \quad (2.4)$$

Donde,

- h_b es la altura de la antena de la estación base en metros
- h_m es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario
- λ es la longitud de onda dada en metros

En las anteriores ecuaciones se puede ver que las perdidas básicas L_b son función de la frecuencia y de la distancia al punto de corte R_b . Teniendo esto en cuenta, las pérdidas de propagación L_p son también función de la frecuencia y de la distancia al punto de corte R_b , al igual que pasará con la potencia recibida y las señales de interferencia.

Los valores típicos de los mencionados parámetros son:

$$s_1 = 2 \text{ a } 2.2$$

$$s_2 = 4 \text{ a } 5$$

$$\sigma_1 = 2.5 \text{ a } 3.5 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 5 \text{ a } 7 \text{ dB}$$

$$R_b = 125 \text{ m (dependiendo del valor de la frecuencia)}$$

$$L_g = 3 \text{ dB}$$

2.2.2 Análisis del enlace descendente

Usando el modelo de propagación de dos pendientes mencionado en el apartado anterior, se va a calcular los estadísticos de interferencia [2] (valor medio y varianza) para encontrar la cobertura de las estaciones GSM.

La Figura 2.2 muestra la configuración de las 8 estaciones GSM con celdas en forma de cigarro que se tienen en cuenta en el análisis, y la Figura 2.3 el diagrama de radiación de las dos antenas utilizadas en cada estación GSM. Se asume que las estaciones GSM estarán espaciadas regularmente a una distancia $2R$. El rendimiento de las estación GSM será estudiada considerando el sector derecho de la estación GSM C1.

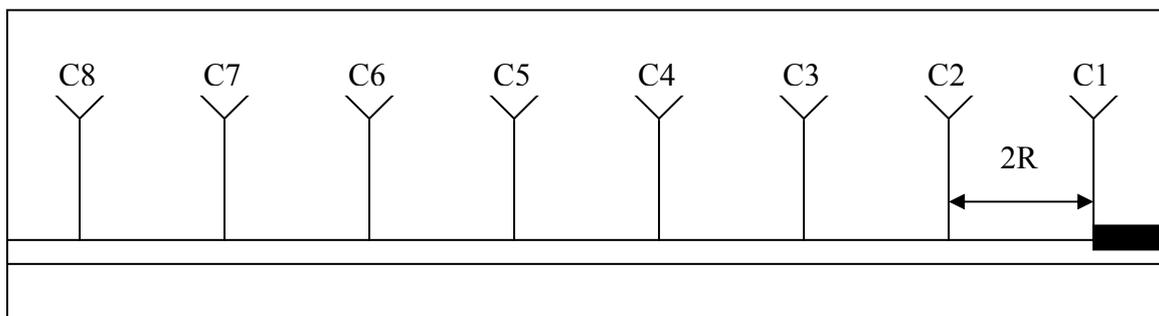


Figura 2-2: Modelo de las estaciones bases en GSM de 8 celdas en forma de cigarro

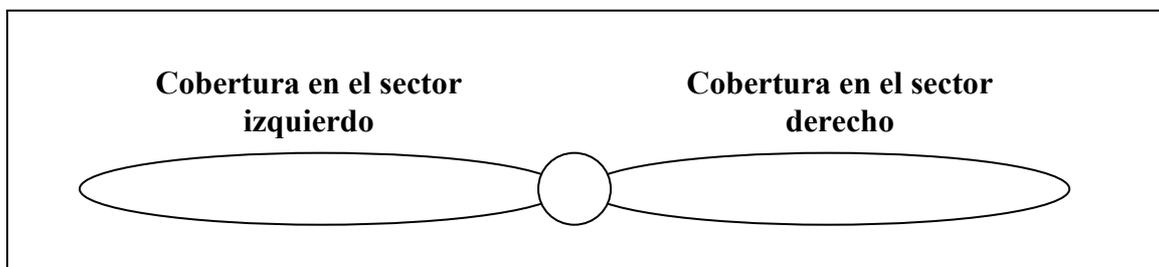


Figura 2-3: Diagrama horizontal de radiación de las dos antenas direccionales usadas en cada estación base

El usuario i está a una distancia r_{io} de la estación GSM bajo estudio (C1) y a una distancia r_{id} de la estación GSM interferente, como se ve en la Figura 2.4.

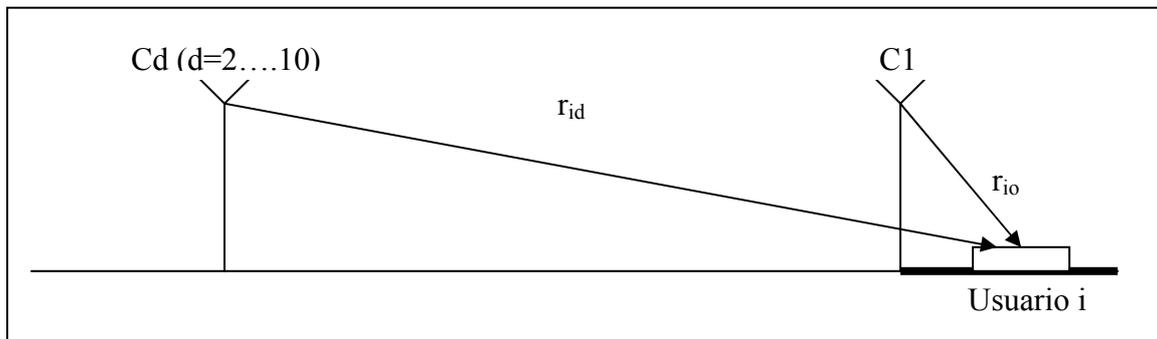


Figura 2-4: Diagrama esquemático del escenario de GSM con un usuario móvil en celdas de autopistas

Con todo ello, la señal de interferencia $L(r_{id}, r_{io})$ debido únicamente a la distancia viene dada por las siguientes fórmulas (dependiendo del valor de estas distancias respecto a R_b):

- Si r_{id} y $r_{io} \leq R_b$ (caso no práctico):

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (2.5)$$

- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{io} \leq R_b$:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{R_b} \right)^{s_1} \left(\frac{R_b}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (2.6)$$

- Si r_{id} y $r_{io} > R_b$:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (2.7)$$

Estos cálculos tienen solo en cuenta la distancia; si se quiere calcular la señal de interferencia $I(r_{id}, r_{io})$ debido a la distancia y al shadowing, se deberá usar la siguiente fórmula:

$$I(r_{id}, r_{io}) = 10^{(\xi_{id} - \xi_{io})/10} L(r_{id}, r_{io}) \quad (2.8)$$

Siendo,

- Si r_{id} y $r_{io} \leq R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_1$ y $\xi_{io} = \xi_1$
- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{io} \leq R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{io} = \xi_1$
- Si r_{id} y $r_{io} > R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{io} = \xi_2$

La potencia recibida de la señal deseada viene dada por:

$$P_r = P_t 10^{-(L_{or}(dB) - G_{tx}(dB) - G_{rx}(dB))/10} \quad (2.9)$$

Donde,

- P_t , es la potencia transmitida de la estación GSM en cada una de las dos direcciones
- L_{or} , es la pérdida (medida en dB) debida a la distancia “r” que existe entre la estación GSM bajo estudio y el usuario
- G_{tx} , es la ganancia de la antena de la estación base medida en dB
- G_{rx} , es la ganancia de la antena móvil que se asume que es 0 dB

La ecuación anterior puede reescribirse como:

$$P_r = k P_t \quad (2.10)$$

Donde k es,

$$k = 10^{-(L_{or}(dB) - G_{tx}(dB) - G_{rx}(dB))/10} \quad (2.11)$$

En L_{or} , el efecto tanto de la distancia como del shadowing está incluido. Para una disponibilidad “ α ” dada, L_{or} viene dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{or}(dB) = L_b + 10 s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \alpha_1 Q^{-1}(\alpha), \quad \text{if } r \leq R_b \\ L_{or}(dB) = L_b + 10 s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \alpha_2 Q^{-1}(\alpha), \quad \text{if } r > R_b \end{array} \right. \quad (2.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{or}(dB) = L_b + 10 s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \alpha_1 Q^{-1}(\alpha), \quad \text{if } r \leq R_b \\ L_{or}(dB) = L_b + 10 s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \alpha_2 Q^{-1}(\alpha), \quad \text{if } r > R_b \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Donde $Q^{-1}(\cdot)$ es la inversa de la función Gaussiana Q , definida por la siguiente ecuación:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad (2.14)$$

La función $Q^{-1}(\cdot)$ tiene un valor de 2.05 para una disponibilidad del 98%, y 2.34 para un valor de disponibilidad del 99%.

El valor esperado de la potencia interferente debido a las demás estaciones GSM (de la 2 a la 8) viene dado por:

$$E[I] = P_r \sum_{d=2}^8 e^{(\beta^2 \sigma^2 / 2)} L(r_{id}, r_{io}) Q \left[\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma} \right] \quad (2.15)$$

Donde,

- β , tiene un valor de $\ln(10)/10$
- σ , es la desviación estándar ($\xi_{id} - \xi_{io}$)
- Q , es la función Gaussiana definida anteriormente

El valor de σ^2 , viene dado por:

- Cuando r_{id} y $r_{io} \leq R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_1$ y $\sigma_{io} = \sigma_1$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_1^2 \quad (2.16)$$

Donde C_{do} es el coeficiente de correlación debido a los parámetros de shadowing ξ_{id} y ξ_{io} .

- Cuando $r_{id} > R_b$ y $r_{io} \leq R_b$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{do}) \sigma_1 \sigma_2 \quad (2.17)$$

- Cuando r_{id} y $r_{io} > R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_2$ y $\sigma_{io} = \sigma_2$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_2^2 \quad (2.18)$$

La varianza de la potencia interferente viene dada por,

$$\text{var}[I_{inter}] = P_r^2 \sum_{d=2}^8 e^{2(\beta^2 \sigma^2)} L(r_{id}, r_{io})^2 \left\{ g\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) - f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) \right\} \quad (2.19)$$

Donde,

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[2\beta\sigma + \frac{10 \log_{10}\{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (2.20)$$

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[\beta\sigma + \frac{10 \log_{10}\{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (2.21)$$

Para un valor de disponibilidad “ α ” dado, la relación señal a ruido más las interferencias, definida por el parámetro “SINR” del usuario bajo estudio viene dado por,

$$SINR = \frac{S}{N + I} = \frac{P_r}{E[I] + P_N + Q^{-1}(\alpha)\sqrt{\text{var}[I]}} \quad (2.22)$$

Donde P_N es el ruido térmico del receptor móvil.

2.2.3 Resultados de la cobertura del enlace descendente

Usando los algoritmos y ecuaciones presentados en los apartados anteriores, se va a pasar a describir los resultados numéricos obtenidos.

Para ello, se ha utilizado un código desarrollado mediante Matlab, en el que se define los parámetros según los siguientes valores:

$C_{do} = 0.5$
$s_1 = 2$
$s_2 = 4$
$\sigma_1 = 3 \text{ dB}$
$\sigma_2 = 6 \text{ dB}$
$R_b = 125 \text{ m}$
$R = 1000 \text{ m}$
$\alpha = 0.99$
$P_t = 1 \text{ W}$
$P_N = -114 \text{ dBm}$
$G_{tx} = 10 \text{ dB}$
$G_{rx} = 0 \text{ dB}$
Frecuencia = 900MHz

Tabla 2-1. Valor de los parámetros para GSM

Dependiendo del tipo de canal, las condiciones de propagación, el grado de calidad requerido, etc. se pueden considerar diferentes SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia) umbrales para el sistema GSM. En nuestro caso, se va a realizar el análisis con un umbral de 11 dB [3].

Con todo ello, se verá en las posteriores gráficas para qué casos se cumple el requisito de GSM, que es que toda la zona de cobertura tiene que tener una Relación Señal a Ruido e Interferencia mayor o igual que la SINR umbral. Para los casos en los que se cumpla, se consideraran implementaciones posibles, y se hará un estudio mas exhaustivo.

2.2.3.1 Influencia del número de bandas de frecuencia en la distancia máxima

Lo primero que se va a hacer es ver la influencia dependiendo del número de bandas con las que se trabaje. Utilizaremos los modelos de 2, 4, y 6 bandas de frecuencia.

Para ello, se va a mostrar una gráfica conjunta que muestra el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia) frente a la distancia que hay entre el usuario y la estación base, para cada uno de los 3 casos. En este caso general y en los posteriores, se ha tenido en cuenta las interferencias de las 5 estaciones más cercanas.

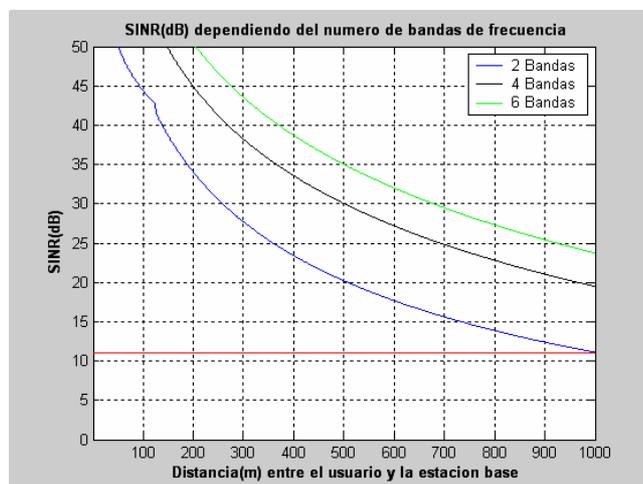


Figura 2-5: SINR dependiendo del número de bandas de frecuencia

Como se puede ver en la Figura 2.5, un aumento de la distancia entre el usuario y la estación base produce una disminución en el SINR. Esto es debido a que un aumento de la distancia reduce el valor del SNR y del SIR, lo que produce una disminución en el SINR, ya que al aumentar la distancia se reduce la potencia recibida, por lo que la relación de la potencia recibida tanto con las interferencias como con el ruido disminuye.

A su vez se puede observar como existe una gran mejoría usando 4 y 6 bandas respecto el uso de únicamente 2 bandas de frecuencia. Poniendo como requisito un SINR umbral de 11dB, se tiene que para 2 bandas se puede cubrir toda la distancia que existe entre dos estaciones GSM, pero se podría decir que es un caso complicado, ya que para el límite del rango del sector (1000 metros) el SINR que se tiene es de 11dB, igual que el umbral. En GSM, se necesita tener toda la zona de cobertura cubierta con un SINR mayor que el umbral, por lo que teóricamente el caso de 2 bandas

de frecuencia se podría utilizar, aunque se puede asegurar a ciencia cierta que va a fallar en cuanto alguno de los parámetros cambie de valor.

Para demostrar esta afirmación, se puede ver en la Figura 2.6 como una variación en uno de los parámetros puede provocar que no se tenga un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector. Por ejemplo, si variamos el factor de correlación C_{do} , en la siguiente figura podemos observar como no se cumple el requisito del SINR umbral.

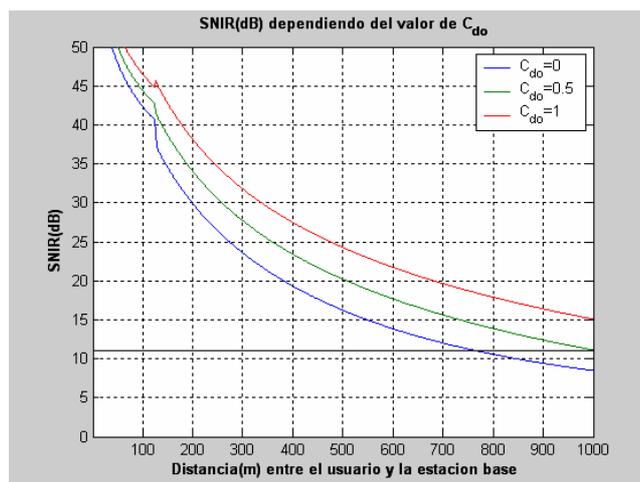


Figura 2-6: SINR dependiendo del valor de C_{do} para 2 bandas de frecuencia

Al igual que pasa para este parámetro, también ocurre para todos los demás, ya que alguno de los valores que pueden tener los parámetros harán que no cumplamos el requisito de tener un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector, por lo que se considera este caso como no válido en una implementación práctica y no se realizará un análisis en mayor profundidad del mismo.

Sin embargo, para los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia, tal y como se observa en la Figura 2.5, se puede dar cobertura con un SINR mucho mayor de 11 dB en todo el rango de distancias representadas en las que se puede situar el usuario. Por ello, en un primer momento se puede decir que ambos casos son válidos. A continuación se va a realizar un exhaustivo análisis de estos dos casos, viendo como influye la variación de cada uno de los parámetros en el SINR.

Además, si se compara los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia, se puede ver como para el caso de 6 bandas de frecuencia el SINR mejora en aproximadamente 4dB respecto al caso de 4 bandas de frecuencia.

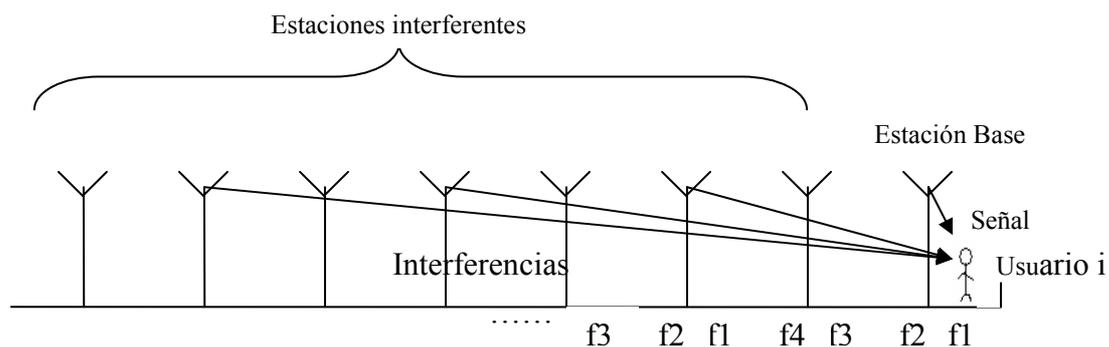
Con todo ello se puede decir, que la utilización de 4 bandas de frecuencia es suficiente a la hora de realizar una implementación de GSM, ya que la implementación de 6 bandas de frecuencia

es más costosa, ya que se tiene que comprar el espectro de frecuencias utilizadas para poder tener la licencia sobre ellas. Por ello, a más bandas de frecuencia, más espectro de frecuencia se necesitará y mayor será el coste. Todo depende del compromiso entre la calidad que se requiera en el sistema y el coste que se puede tener, ya que con 6 bandas de frecuencia se aumentará el SINR en 4dB por lo que aumentará la calidad de la comunicación, pero se tendrá que comprar la licencia de dos bandas más de espectro de frecuencia.

A continuación, se va a ver la influencia que tienen los diferentes parámetros en cada uno de los dos casos posibles, 4 y 6 bandas de frecuencia.

2.2.3.2 Cuatro bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros

La situación con la que nos encontramos es la siguiente:



La Figura 2.7 nos muestra como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_1 .

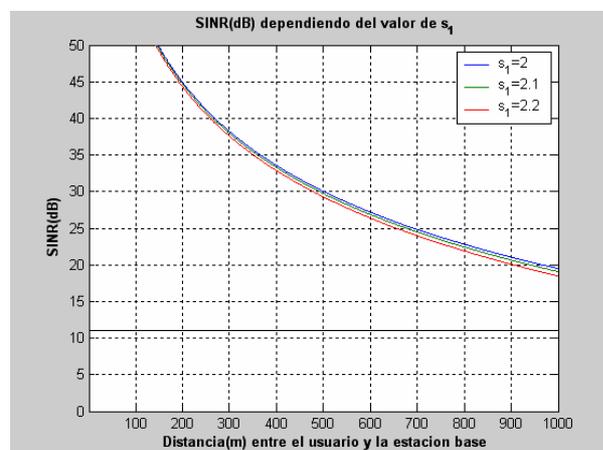


Figura 2-7: SINR dependiendo del valor de s_1

En la Figura 2.7, se puede ver como influye la variación del parámetro s_1 . Como se puede ver, el SINR mejora levemente para un valor más bajo de s_1 , siendo la variación entre los valores de 2 y 2.2 de aproximadamente 1dB. Si se quiere un SINR umbral de 11dB, se puede ver que los 3 valores son posibles, ya que nos dan un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector.

Con ello, sacamos como conclusión un valor más bajo de s_1 mejora el SNR con lo que se mejora el SINR, mientras que el SIR se mantiene constante cuando se varía el parámetro s_1 como se puede ver en las siguientes figuras:

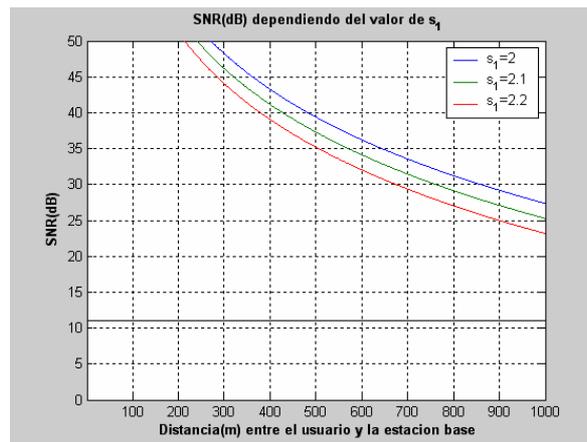


Figura 2-8: SINR dependiendo del valor de s_1

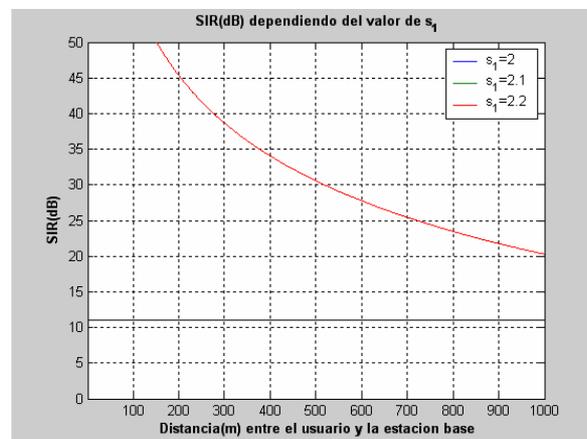


Figura 2-9: SIR dependiendo del valor de s_1

En la Figura 2.10, se puede ver como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_2 .

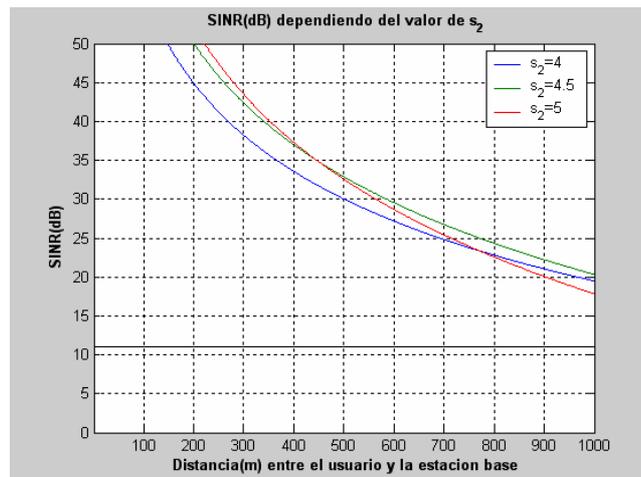


Figura 2-10: SINR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en la gráfica, de los valores del parámetro s_2 representados (4, 4.5 y 5), se da cobertura a todo el rango del sector con un SINR mayor que el umbral para los 3 valores, por lo que los 3 son valores posibles para dicho parámetro en el caso de 4 bandas de frecuencia.

En este caso, se puede ver como dependiendo de la distancia, la influencia del parámetro varía considerablemente, ya que en algunos tramos el mejor SINR se consigue con el menor valor del parámetro s_2 mientras que en el último tramo esto varía, teniendo los mejores valores del SINR para valores mayores de s_2 .

Esta variación dependiendo de la distancia a la que se sitúe el usuario respecto a la estación base es debido a que en cada tramo de la gráfica (hasta 400 metros y a partir de esta distancia) influyen diferentes fenómenos. Hasta una distancia de 400 metros, existe un mejor aislamiento, lo que produce una menor interferencia y por ello el SINR es mayor para valores más altos del parámetro s_2 . En cambio a partir de esta distancia, se produce un aumento en las pérdidas por un aumento de la distancia lo que produce que se consiga un mayor SINR con valores más pequeños del parámetro s_2 . El punto de cambio se produce cuando ambos fenómenos se restan a una distancia de 400 metros.

En el caso de este parámetro, la variación de s_2 influye tanto en el SIR como en el SNR (en este caso la variación se observa únicamente a partir de la distancia R_b). Esto lo se puede ver observando las siguientes figuras, en las que se puede ver como varía tanto el SNR como el SIR al variar el parámetro s_2 :

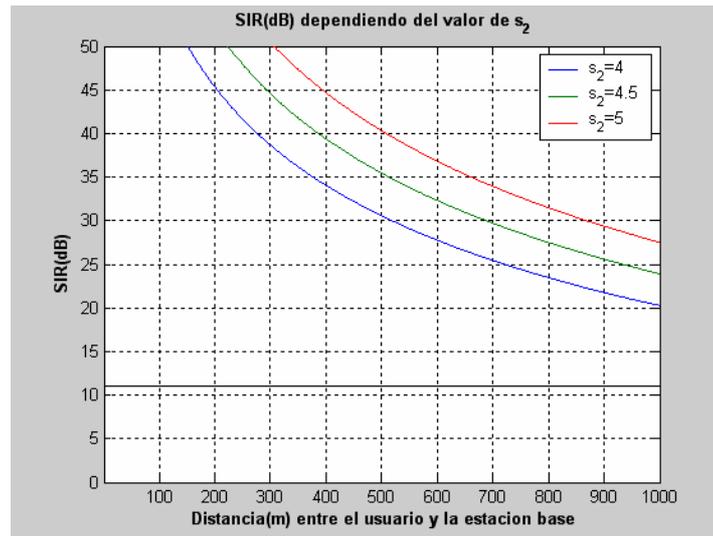


Figura 2-11: SIR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en esta figura, el mejor SIR se consigue para valores más altos del parámetro s_2 , al contrario que pasa en la siguiente figura, en la que el SNR mejora para valores más pequeños de s_2 . Debido a esto, el SINR se comporta como vimos en la Figura 2.10, ya que es una mezcla de ambas influencias.

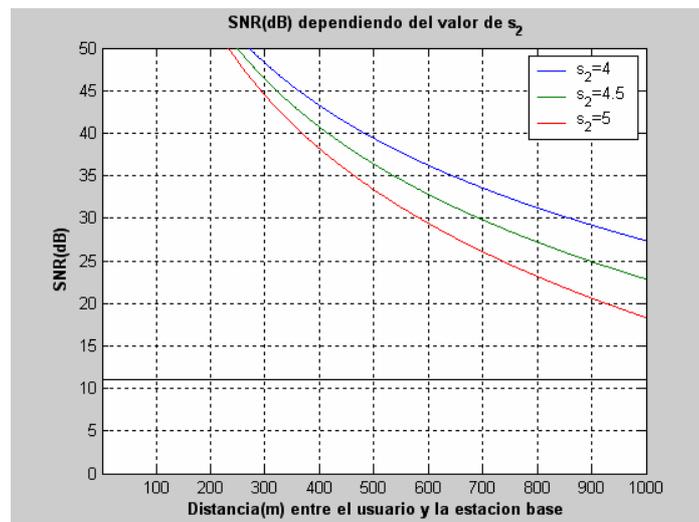


Figura 2-12: SNR dependiendo del valor de s_2

En la figura 2.13, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_1 .

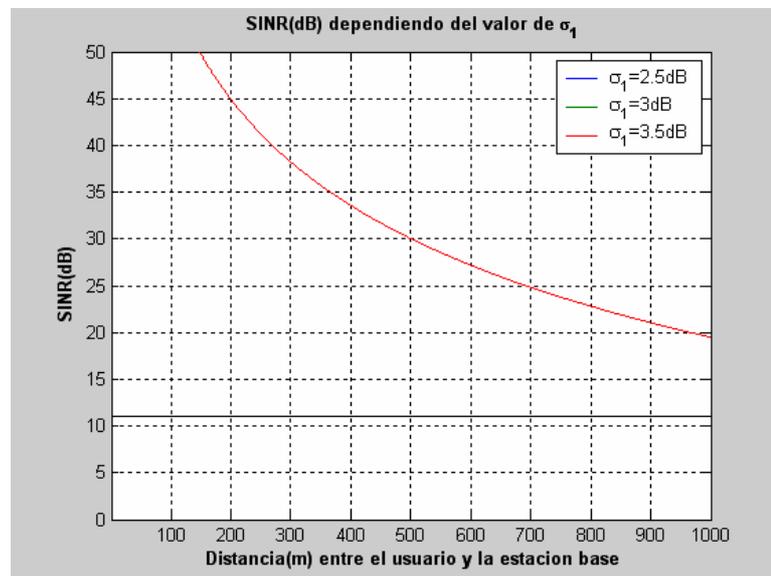


Figura 2-13: SINR dependiendo del valor de σ_1

Como se puede observar, la influencia de la variación del parámetro σ_1 en el SINR es nula, esto es debido a que tanto la influencia de σ_1 en el SNR como en el SIR es nula también. Si se quiere un SINR mínimo de 11dB, se puede ver que se puede dar cobertura a todo el rango de distancias representadas con cualquier valor de σ_1 .

Esto es debido a que a partir de una distancia igual al punto de ruptura R_b no influye el parámetro σ_1 de la primera pendiente, y como se puede ver si que influirá el parámetro de la segunda pendiente σ_2 .

Con esto, se puede ver que en el caso de 4 bandas de frecuencia, cualquier valor de σ_1 es posible para dar una buena comunicación (con un SINR superior a 11dB) a toda la zona de cobertura.

En la Figura 2.14, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_2 .

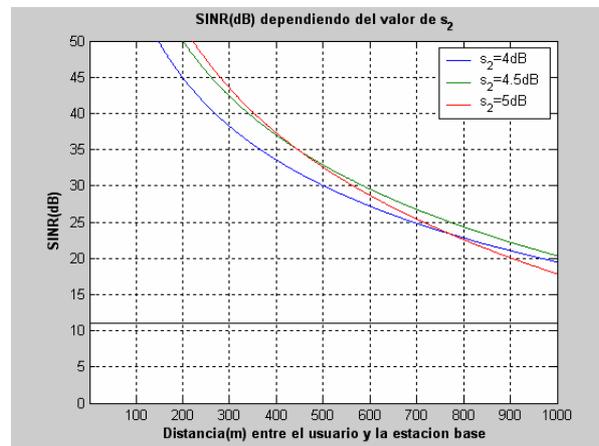


Figura 2-14: SINR dependiendo del valor de σ_2

Como se puede ver en la gráfica, si se quiere un SINR de cómo mínimo el SINR umbral de 11dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), se puede ver en la figura, que tanto el valor de σ_2 de 5 como el de 6 como el de 7 son válidos, ya que con cualquiera de ellos se da una comunicación con un SINR mayor que el umbral.

Además se puede ver como una disminución de σ_2 , aumenta el SINR notablemente. Esto es debido a que el incremento del valor de σ_2 , incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo de esta manera el SIR, por lo que se reduce también el SINR.

En la Figura 2.15, se puede ver como influye la variación de la correlación de shadowing, determinada por el parámetro C_{do} , en la relación señal a ruido, determinada por el parámetro SINR.

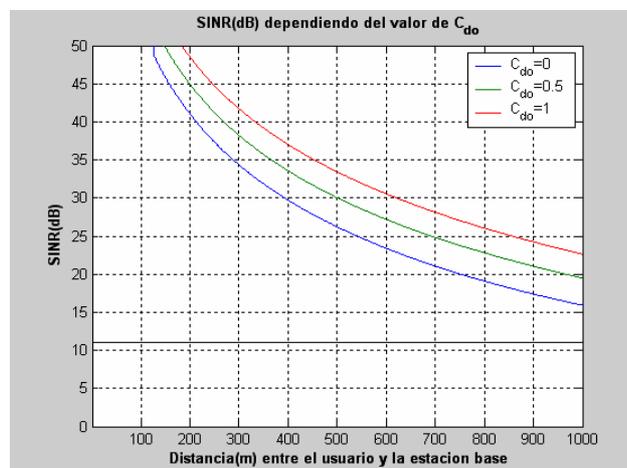


Figura 2-15: SINR dependiendo del valor de la correlación (C_{do})

Como se puede ver se tiene para todos los valores del factor de correlación cubierta toda la zona de cobertura del usuario a la estación base, por lo que cualquier valor de correlación representado (0, 0.5 y 1) es posible en una implementación práctica.

Por ello, se concluye que al aumentar la correlación se aumenta levemente el SINR, esto es debido a que un incremento en el C_{do} , reduce el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que se incrementa el SIR y con ello aumenta el valor del SINR. Además, se puede decir que la correlación no influye para nada en el SNR, ya que ni la potencia recibida ni la potencia de ruido depende de la correlación.

En la Figura 2.16, se puede ver como influye en el SINR la variación de la frecuencia.

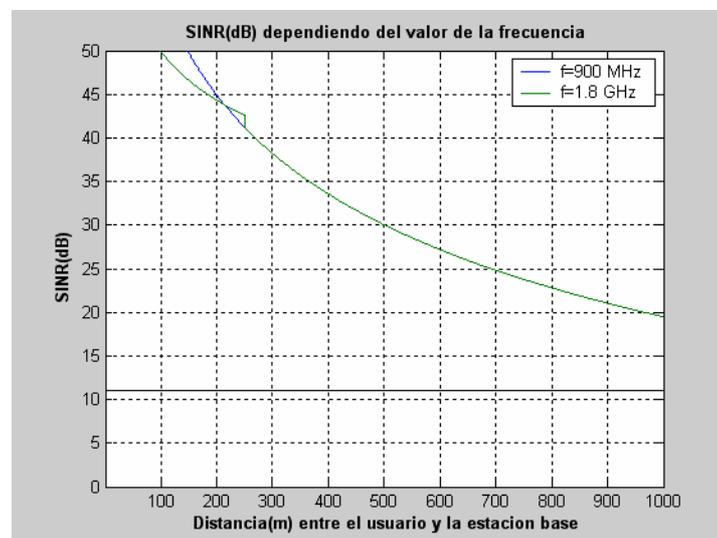


Figura 2-16: SINR dependiendo del valor de la frecuencia

En GSM, el valor de R_b cambia dependiendo del valor de la frecuencia. Esto lo se puede ver mediante la relación entre ambos determinada por la siguiente ecuación;

$$R_b \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda}$$

Se puede considerar el valor de la altura del móvil " h_m " como 1 metro (el usuario se encuentra en el interior del vehículo) y la altura de la antena " h_b " debe situarse aproximadamente a unos 10 metros, ya que se está en el caso de microceldas.

Con estos datos y a una frecuencia de 900 MHz, R_b tiene un valor aproximado de 125m, mientras que para el otro caso, con una frecuencia de 1.8GHz, se tiene un valor de R_b de aproximadamente 250m. Con estos dos datos se ha calculado la gráfica anterior.

Si mantuviéramos el valor de R_b que se tiene para 900MHz, usando una frecuencia del doble (1.8GHz), se tendría que la antena de la estación base se tendría que situar a unos 20 metros, algo que no se puede dar en el caso de microceldas. Por ello, en el caso de GSM, se varía el valor del parámetro R_b en función del valor de la frecuencia. Si tuviéramos frecuencias menores, se podría mantener el valor de R_b a costa de poner las antenas a una altura mayor.

Como se puede ver en la gráfica, a partir de una distancia de 250m, se tiene el mismo SINR para ambas frecuencias, siendo este mayor que el umbral en todo el rango del sector. Por ello, se dedujo que ambos valores de las frecuencias son válidos en el modelo de 4 bandas de frecuencia.

Esta variación en el primer tramo de distancias es debida a que un aumento de la frecuencia disminuye la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias. Esto es lógico, porque la frecuencia determina el valor de las pérdidas, y al aumentar la frecuencia, aumentan también las pérdidas. Por ello, disminuye el SNR al aumentar la frecuencia, y por ello, disminuye el SINR. En cambio, el valor del SIR se mantiene constante al variar la frecuencia, ya que aumenta proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia.

En la Figura 2.17, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de la distancia que hay entre las estaciones base (R es la mitad de la distancia entre las estaciones base).

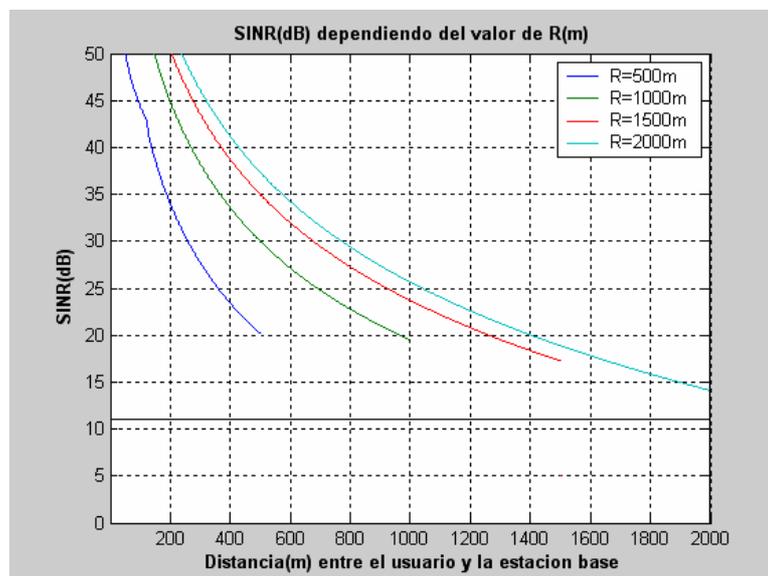


Figura 2-17: SINR dependiendo del valor de R (2R es la distancia entre las estaciones base)

En la gráfica se puede ver como para un R de 500m, se tiene toda la zona de cobertura cubierta con un SINR mayor de 11dB en la zona de sector, que en este caso es de 500 metros.

También para los otros dos valores, tanto para un R de 1000m, 1500m como de 2000m, cubrimos todo el sector con un SINR mayor al umbral de 11dB. Otro dato importante, es que cuanto mayor es R, mayor es el SINR. Esto es debido a que, cuando se aumenta la R, disminuye el valor de las interferencias, en cambio la potencia recibida se mantiene constante, por lo que el SIR aumenta, lo que conlleva a un aumento en el SINR.

Por todo ello, en el caso de 4 bandas de frecuencia, se tiene como posibles todos los valores estudiados de R, ya que nos aseguran un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector.

Como conclusión, se tiene que cuando se aumenta la distancia que existen entre las estaciones base, se aumenta el SIR (manteniéndose constante el SNR, ya que tanto la Potencia Recibida como la Potencia de ruido se mantienen constantes) lo que conlleva a un aumento del SINR como se ha expuesto anteriormente. Esto es debido a que, para una distancia dada desde la estación base, reduciendo el valor de R se incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo así el valor del SIR, por lo que también se produce una reducción del SINR.

En la Figura 2.18, se puede ver como afecta la variación de la potencia de transmisión al SINR.

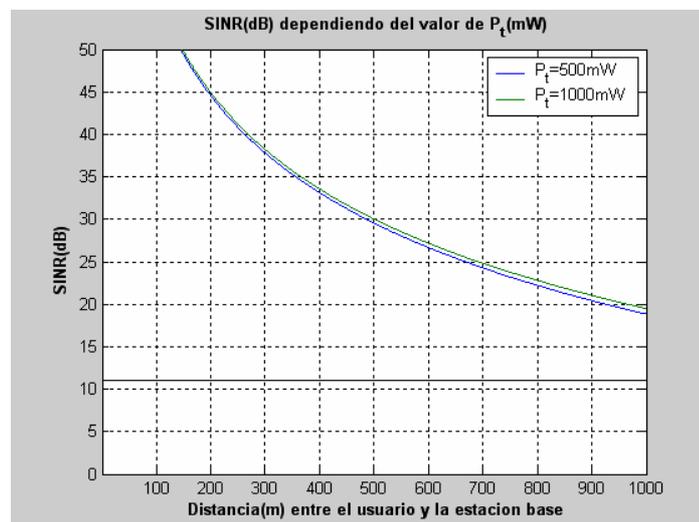


Figura 2-18: SINR dependiendo del valor de la potencia de transmisión

Como se puede ver en la gráfica, ambos valores de la potencia de transmisión son válidos ya que nos dan un SINR mayor a 11dB en todo el sector, por lo que dichos valores se puede considerar buenos en el caso de 4 bandas de frecuencia.

Como se puede ver en la gráfica, a medida que se aumenta la potencia de transmisión aumenta la Relación Señal a Ruido e Interferencia. Esto es lógico ya que al aumentar la potencia de transmisión se aumenta proporcionalmente la potencia recibida, por lo que se aumenta el SNR (Relación señal a ruido) y con ello se produce un aumento en el SINR. Se debe tener en cuenta de que la Relación señal a interferencia SIR no varía con la variación de la potencia transmitida (las interferencias aumentan o disminuyen proporcionalmente con la potencia de transmisión), por lo que el motivo por el que varía el SINR es únicamente porque al aumentar la potencia de transmisión aumenta la potencia recibida, por lo que el SNR aumenta.

Esto lo se puede ver representando la influencia que tiene la variación de la potencia de transmisión en los parámetros SNR y SIR.

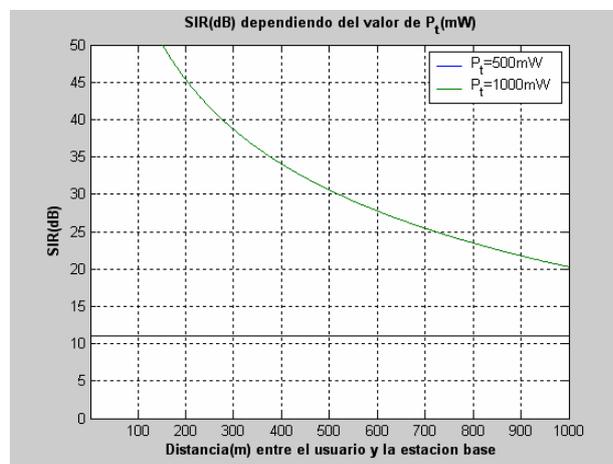


Figura 2-19: SIR dependiendo del valor de la Potencia de transmisión

Como se puede ver en la Figura 2.19, el SIR no varía cuando varía la potencia de transmisión. Esto es algo lógico ya que cuando aumenta la potencia de transmisión aumenta de manera proporcional las interferencias, por lo que no influye en la Relación señal a interferencia esta variación.

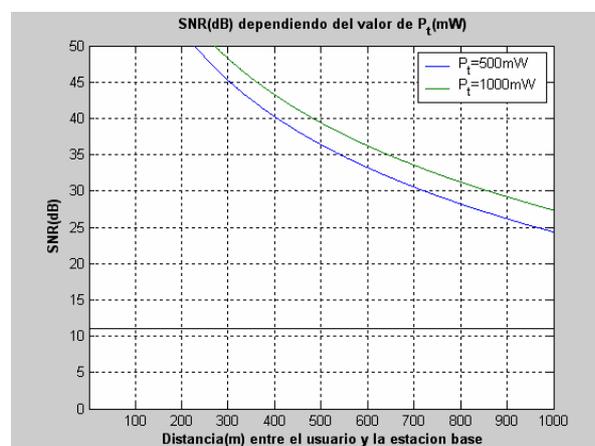


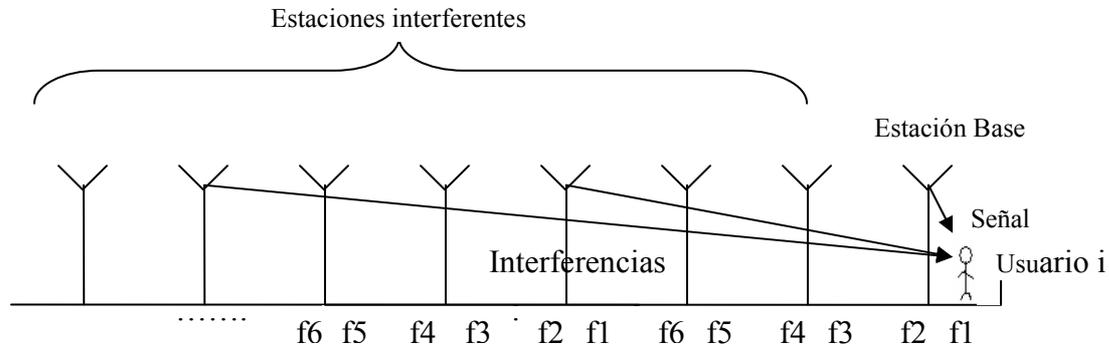
Figura 2-20: SNR dependiendo del valor de la Potencia de transmisión

En cambio, como se puede ver en la Figura 2.20, el SNR si que varía enormemente al variar la potencia de transmisión. Esta variación entre la relación de la señal y el ruido es lo que hace que influya la variación de la potencia de transmisión en el SINR.

A su vez, como ya se verá en el siguiente apartado, la potencia de transmisión influye de una manera mayor en el caso de 6 bandas de frecuencia que en el caso de 4 bandas de frecuencia. Esto es debido a que, en el caso de 4 bandas de frecuencia, la interferencia es mayor que para el caso de 6 bandas de frecuencia en el que la interferencia es menor por lo que se nota más la influencia del ruido. Con ello, en el caso de 6 bandas de frecuencia, el SNR tiene una influencia mayor y por ello, la variación de la potencia de transmisión tiene mayor influencia en el SINR.

2.2.3.3 Seis bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros

La situación en la que nos encontramos es la siguiente:



La Figura 2.21, nos muestra como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_1 .

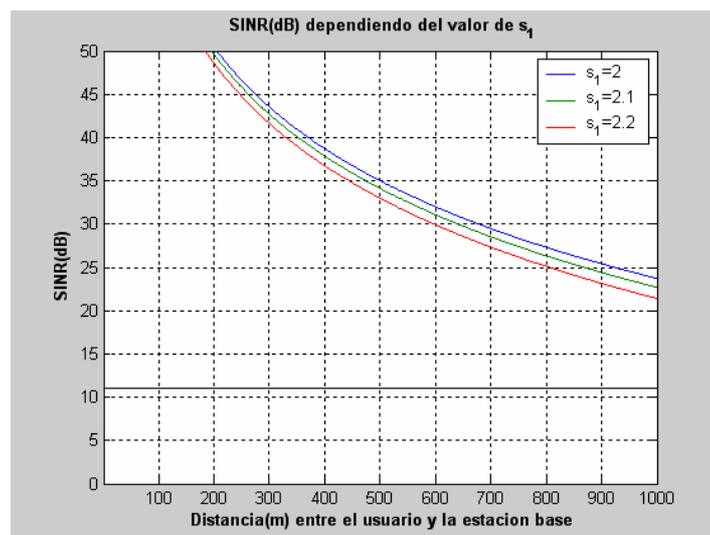


Figura 2-21: SINR dependiendo del valor de s_1

Se puede ver que el SINR mejora para un valor más bajo de s_1 , esto es debido a que el SINR mejora para un valor más bajo de s_1 , lo que hace que el SINR mejore de la misma manera.

Como pasaba en el caso de 4 bandas de frecuencia, todos los valores representados del parámetro s_1 son posibles ya que nos dan un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector.

También hay que tener en cuenta, que en este caso respecto al de 4 bandas de frecuencia, el SINR mejora en un poco menos de 4dB, como ya dijimos en el caso general que representamos en la Figura 2.5.

Además, para 6 bandas de frecuencia, existe una mayor influencia que para el caso anterior. Esto es debido a que al aumentar el número de bandas, las interferencias se hacen más pequeñas, por lo que pasa a tener una mayor influencia la relación que existe entre la señal y el ruido, que la que tiene la relación entre la señal y las interferencias.

En la Figura 2.22, se puede ver como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_2 .

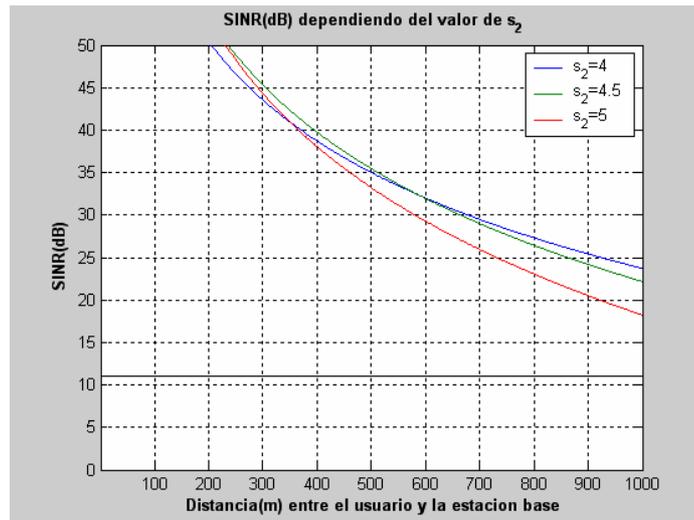


Figura 2-22: SINR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en la gráfica, al igual que pasaba para el caso de 4 bandas de frecuencia, se tiene en todo el sector un SINR mayor que el umbral para todos los valores representados del parámetro s_2 , por lo que todos ellos son valores posibles en una implementación práctica, ya que nos asegura que se va a tener un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector.

Para este parámetro, se puede ver como dependiendo de la distancia, la influencia del parámetro varía considerablemente, ya que en algunos tramos el mejor SINR se consigue con el menor valor del parámetro s_2 mientras que en el último tramo esto varía, teniendo los mejores valores del SINR para valores mayores de s_2 .

Esta variación dependiendo de la distancia a la que se sitúe el usuario respecto a la estación base es debido a que en cada tramo de la gráfica (hasta 400 metros y a partir de esta distancia) influyen diferentes fenómenos. Hasta una distancia de 400 metros, existe un mejor aislamiento, lo que produce una menor interferencia y por ello el SINR es mayor para valores más altos del parámetro s_2 . En cambio a partir de esta distancia, se produce un aumento en las pérdidas por un aumento de la distancia lo que produce que se consiga un mayor SINR con valores más pequeños

del parámetro s_2 . El punto de cambio se produce cuando ambos fenómenos se restan a una distancia de 400 metros.

En el caso de este parámetro, la variación de s_2 influye tanto en el SIR como en el SNR (en este caso la variación se observa únicamente a partir de la distancia R_b). Esto lo se puede ver observando las siguientes figuras, en las que se puede ver como varía tanto el SNR como el SIR al variar el parámetro s_2 :

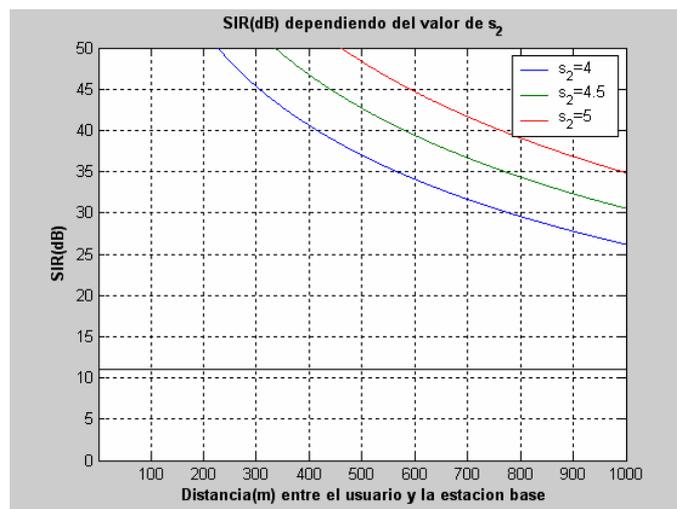


Figura 2-23: SIR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en esta figura, el mejor SIR se consigue para valores más altos del parámetro s_2 , al contrario que pasa en la siguiente figura, en la que el SNR mejora para valores más pequeños de s_2 . Debido a esto, el SINR se comporta como vimos en la Figura 2.22, ya que es una mezcla de ambas influencias.

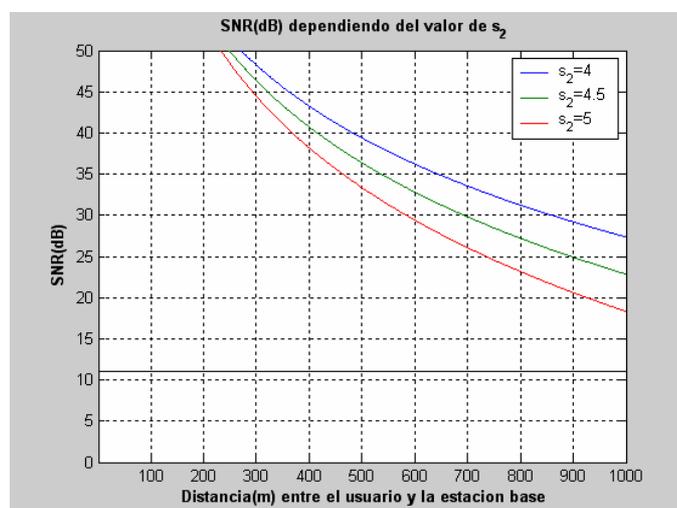


Figura 2-24: SNR dependiendo del valor de s_2

En la figura 2.25, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_1 .

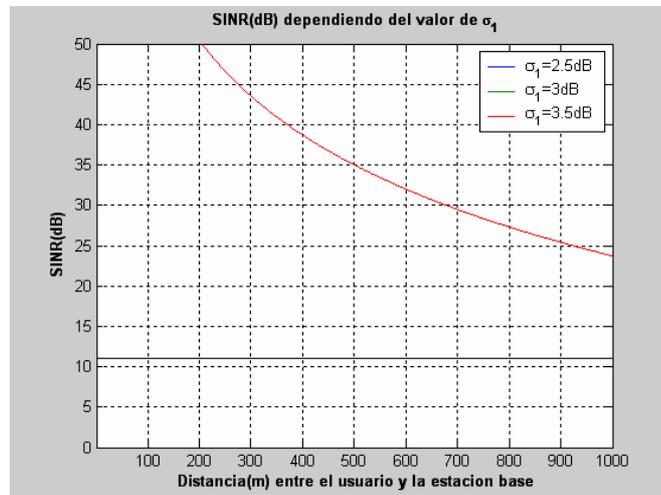


Figura 2-25: SINR dependiendo del valor de σ_1

Como se puede observar, la influencia de la variación del parámetro σ_1 en el SINR es nula, esto es debido a que tanto la influencia de σ_1 en el SNR como en el SIR es nula también. Si se quiere un SINR mínimo de 11dB, se puede ver que se puede dar cobertura a todo el rango de distancias representadas con cualquier valor de σ_1 .

Esto es debido a que a partir de una distancia igual al punto de ruptura R_b no influye el parámetro σ_1 de la primera pendiente, y como se puede ver si que influirá el parámetro de la segunda pendiente σ_2 .

Por ello, cualquiera de los valores representados del parámetro σ_1 es válido, ya que se puede dar una comunicación de calidad en todo el rango de distancias con un SINR mayor que el umbral, al igual que pasaba para el caso de 4 bandas de frecuencia.

Respecto al caso anterior de 4 bandas de frecuencia, se tiene una mejor de la Relación Señal a Ruido e Interferencia de aproximadamente 4dB.

En la Figura 2.26, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia) la variación de σ_2 .

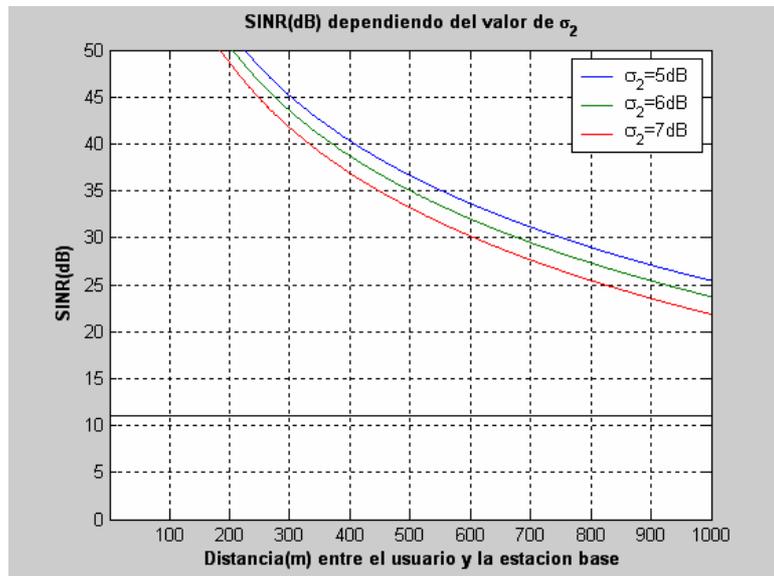


Figura 2-26: SINR dependiendo del valor de σ_2

Si se quiere un SINR de cómo mínimo 11dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), se puede ver como para los 3 valores de σ_2 5, 6 y 7, se da un SINR en todo el sector mayor que el umbral, por lo que dichos valores son posibles en una implementación real.

Además se puede ver como una disminución de σ_2 , aumenta el SINR. Esto es debido a que el incremento del valor de σ_2 , incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo de esta manera el SIR, por lo que se reduce también el SINR

Por ello, al igual que en el caso de 4 bandas de frecuencia, se dedujo que todos los valores de σ_2 representados son válidos para conseguir una buena comunicación en todo el rango de cobertura dando un SINR mayor a 11dB.

En la Figura 2.27, se puede ver como influye la variación de la correlación de shadowing, determinada por el parámetro C_{do} , en la relación señal a ruido, determinada por el parámetro SINR.

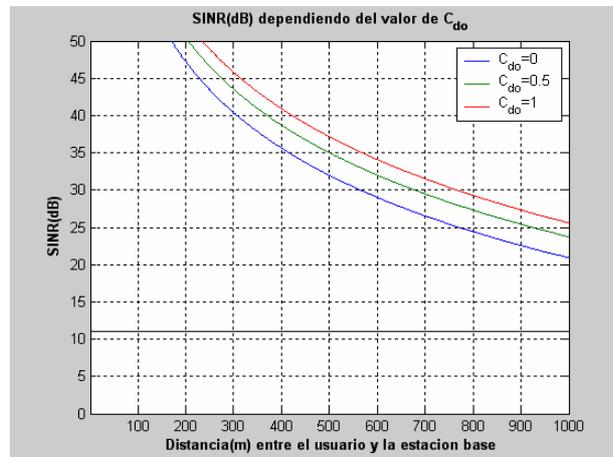


Figura 2-27: SINR dependiendo del valor de la correlación (C_{do})

En el caso de 6 bandas de frecuencia, se puede ver como la correlación influye en el SINR de una manera mucho menor que en el caso anterior.

Se ve como para todos los valores de C_{do} , cubrimos todo el sector con un SINR mayor que el umbral, por lo que todos los valores son posibles en la práctica.

Por ello, se concluye que al aumentar la correlación se aumenta levemente el SINR, esto es debido a que un incremento en el C_{do} , reduce el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que se incrementa el SIR y con ello aumenta el valor del SINR. Además, se puede decir que la correlación no influye para nada en el SNR, ya que ni la potencia recibida ni la potencia de ruido depende de la correlación.

En la Figura 2.28, se puede ver como influye en el SINR la variación de la frecuencia.

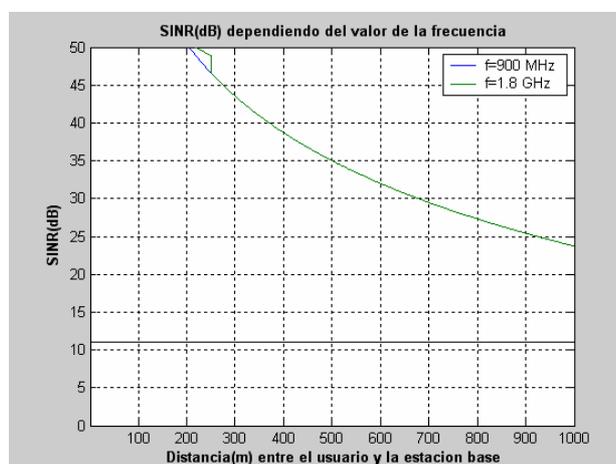


Figura 2-28: SINR dependiendo del valor de la frecuencia

Al igual que pasaba para el caso de 4 bandas de frecuencia, en GSM, el valor de R_p cambia dependiendo del valor de la frecuencia.

Como se puede ver en la gráfica, a partir de una distancia de 250m, se tiene el mismo SINR para ambas frecuencias, siendo este mayor que el umbral en todo el rango del sector. Por ello, se dedujo que ambos valores de las frecuencias son válidos en el modelo de 6 bandas de frecuencia.

Esta variación en el primer tramo de distancias es debida a que un aumento de la frecuencia disminuye la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias. Esto es lógico, porque la frecuencia determina el valor de las pérdidas, y al aumentar la frecuencia, aumentan también las pérdidas. Por ello, disminuye el SNR al aumentar la frecuencia, y por ello, disminuye el SINR. En cambio, el valor del SIR se mantiene constante al variar la frecuencia, ya que aumenta proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia.

En la figura 2.29, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de la distancia que hay entre las estaciones base (R es la mitad de la distancia entre las estaciones base).

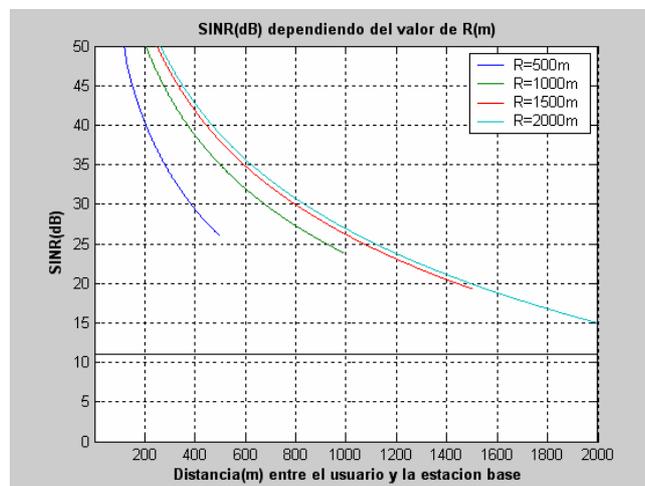


Figura 2-29: SINR dependiendo del valor de R ($2R$ es la distancia entre las estaciones base)

Como se puede observar, al igual que para el caso de 4 bandas de frecuencia, los 4 valores analizados de R son válidos ya que se tiene toda la zona de cobertura cubierta con un SINR mayor a 11dB.

Al igual que en el caso de 4 bandas de frecuencia, todos los valores analizados de R son posibles, ya que nos dan una Relación Señal a Ruido e Interferencia mayor a la umbral, por lo que se puede dar una buena comunicación en todo el sector.

Como conclusión, se tiene que cuando se aumenta la distancia que existen entre las estaciones base, se aumenta el SIR (manteniéndose constante el SNR, ya que tanto la potencia Recibida como la potencia de ruido se mantienen constantes) lo que conlleva a un aumento del SINR como se ha expuesto anteriormente. Esto es debido a que, para una distancia dada desde la estación base, reduciendo el valor de R se incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo así el valor del SIR, por lo que también se produce una reducción del SINR.

En la Figura 2.30, se puede ver como afecta la variación de la potencia de transmisión al SINR.

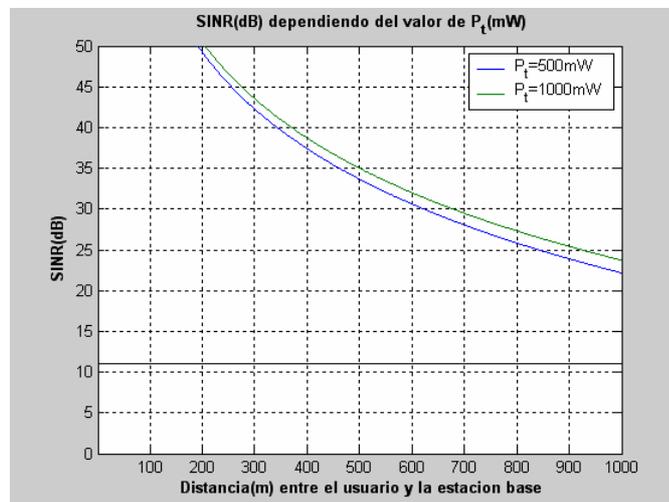


Figura 2-30: SINR dependiendo del valor de la potencia de transmisión

Como se puede ver en la gráfica, al igual que pasaba para el caso de 4 bandas de frecuencia, los dos valores representados de la potencia de transmisión son válidos ya que nos dan un SINR mayor a 11dB en todo el sector, por lo que dichos valores se pueden considerar buenos en el caso de 6 bandas de frecuencia.

Además se puede observar que a medida que se aumenta la potencia de transmisión aumenta la Relación Señal a Ruido e Interferencia. Esto es lógico ya que al aumentar la potencia de transmisión se aumenta proporcionalmente la potencia recibida, por lo que se aumenta el SNR (Relación señal a ruido) y con ello se produce un aumento en el SINR. Se debe tener en cuenta de que la Relación señal a interferencia SIR no varía con la variación de la potencia transmitida (las interferencias aumentan o disminuyen proporcionalmente con la potencia de transmisión), por lo que el motivo por el que varía el SINR es únicamente porque al aumentar la potencia de transmisión aumenta la potencia recibida, por lo que el SNR aumenta.

2.3 Conclusiones de GSM

Con todo ello, se puede concluir que en GSM, se tienen buenos resultados utilizando 4 y 6 bandas de frecuencia, mientras que el caso de 2 bandas de frecuencia no es posible en una implementación real.

En el caso de 2 bandas de frecuencia, no se tiene un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector, situándonos en el límite de 11dB para una distancia de 1000 metros, considerada el rango del sector. Como se muestra en la Figura 2.6, cuando se varía el valor de alguno de los parámetros, no se tiene un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector, por lo que si lo implementamos en la práctica no conseguimos los resultados requeridos, que en este caso es tener un SINR en todo el rango del sector mayor que 11dB, por ello, se puede considerar una solución inviable y por ello no se ha realizado un estudio detallado como para los otros dos casos.

Para el caso de 4 y 6 bandas de frecuencia, si cubrimos toda la zona de cobertura en la que puede situarse el usuario (esta zona de cobertura es el rango del sector que es de 1000 metros) sea cual sea el valor de los parámetros con un SINR mayor que el umbral, por lo que ambos casos son posibles en una implementación práctica.

También se observa, que en el caso de 6 bandas de frecuencia, mejoramos los resultados respecto a 4 bandas de frecuencia, aumentando en casi todos los casos la Relación Señal a Ruido e Interferencia en aproximadamente 4dB.

Así mismo, se ha deducido cuales parámetros de todos los representados influyen de una manera mayor que los demás en cada uno de los casos.

Un aumento en el parámetro s_1 hace que disminuya el SNR, lo que produce una disminución en el SINR. Esto es debido a que una variación del parámetro s_1 produce una variación de la potencia recibida, pero no varía la potencia del ruido, por lo que se produce una variación en el SNR. De la misma manera, la variación de este parámetro varía proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia, por lo que no se produce una variación en el SIR.

El parámetro s_2 tiene una variación un poco más compleja. En el primer tramo de distancias, el SINR aumenta cuando aumenta s_2 . Esto es debido a que en este tramo se produce un mejor aislamiento por lo que se reduce las interferencias, por lo que un aumento de s_2 produce un aumento en el SIR lo que conlleva a un aumento en el SINR. En cambio, en el segundo tramo de distancias, aumentan las pérdidas por distancia, por lo que un aumento del s_2 produce una

disminución en el SINR. Esto es debido a que un aumento del parámetro s_2 produce una disminución en el SNR (ya que se produce un aumento en las pérdidas), por lo que a su vez se produce una disminución en el SINR.

Si nos fijamos en la variación del parámetro σ_1 tiene una influencia prácticamente nula en el SINR en cualquiera de los casos estudiados. Esto es debido a que a partir de una distancia igual al punto de corte R_b , el parámetro σ_1 no influye en los cálculos, por lo que su variación no influye en el SINR.

En cambio, σ_2 sí que influye en el SINR, ya que un aumento de σ_2 produce un aumento del valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo el SIR se reduce y de la misma manera se produce un descenso en el SINR.

La correlación está determinada por el parámetro C_{do} . Como se ha visto en las gráficas que mostraban la influencia de la variación de este parámetro, un aumento del mismo produce un aumento en el SINR. Esto es debido a que un aumento del C_{do} produce una disminución en el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que aumenta el SIR y con él el SINR. Además, se ha podido ver como a medida que aumenta el número de bandas, la influencia del C_{do} es menor. Esto es debido a que al aumentar el número de bandas, disminuyen las interferencias por lo que no influye tanto el SIR y pasa a tener una mayor influencia el SNR, que ante la variación del C_{do} se mantiene constante.

Un aumento de la frecuencia produce un aumento de las pérdidas. Por este motivo, la variación de la frecuencia sí tiene una influencia en el SNR, que debido a que al aumentar la frecuencia se produce un aumento de las pérdidas, se reduce en valor del SNR y por ello también se reduce el valor del SINR. En cambio, la variación de la frecuencia no influye en el SIR, ya que tanto la potencia recibida como las interferencias varía de la misma manera ante el cambio de la frecuencia, por lo que la relación entre ambas se mantiene constante. Además como vimos en el apartado de la frecuencia, no se puede mantener el R_b constante para los 2 valores de frecuencia, ya que si no se tendría que la antena tiene que situarse a una altura demasiado alta para una microcelda. Por ello, para cada valor de la frecuencia, se dará un valor de R_b diferente para que en ambos casos la antena se sitúe a una altura de 10 metros.

Otro parámetro que se ha variado es la distancia que existe entre dos estaciones base contiguas. Al aumentar la distancia que existe entre dos estaciones, se produce un aumento del SIR, ya que la potencia recibida se mantiene constante, en cambio las interferencias disminuyen, por lo que una relación entre ambas que es el SIR aumenta. Este aumento del SIR es lo que produce un

aumento en el SINR ante un aumento de R. De la misma manera, la potencia de Ruido se mantiene constante ante una variación de la frecuencia, al igual que la potencia recibida, por lo que el SNR que es la relación entre ambas se mantiene constante. Además, se puede ver como a medida que se aumenta el número de bandas de frecuencia, la influencia de la variación de R disminuye, ya que a medida que se aumenta el número de bandas, se reduce el valor de las interferencias, por lo que el deja de tener tanta influencia el SIR, y no se produce una influencia grande al variar la distancia que hay entre las estaciones.

Por último, se ha realizado un estudio de cómo influye la variación en el SINR de la potencia transmitida. Como es lógico, un aumento de la potencia transmitida varía el SNR, ya que la potencia de ruido se mantiene constante mientras que la potencia recibida aumenta, lo que produce un aumento de la potencia recibida cuando aumenta la potencia transmitida. En cambio, la variación de la potencia transmitida no influye en el SIR, ya que esta variación influye tanto en la potencia recibida como en la potencia de las interferencias, por lo que la relación entre ambas se mantiene constante. Por ello, se dedujo que un aumento en la potencia transmitida, aumenta la potencia recibida y el valor de las interferencias, por lo que se produce un aumento en el SNR lo que produce un aumento en el SINR, mientras que el SIR se mantiene constante.

Con todo ello, deseamos totalmente el caso de 2 bandas de frecuencia, y se tiene en cuenta tanto el caso de 4 como el de 6 bandas de frecuencia, ya que se ha comprobado que para cualquier valor de los parámetros, se está en las condiciones requeridas para el uso de GSM que es dar en todo el rango del sector, una Relación Señal a Ruido e Interferencia mayor a la umbral, que se ha situado en 11dB.

La máxima distancia para la que se cumple este requisito de SINR mínimo para un rango del sector de 1000 metros es, en el caso de 4 bandas de frecuencia de 1830 metros, y en el caso de 6 bandas de frecuencia, la máxima distancia a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 2250 metros para cumplir este requisito.

El uso de 4 o 6 bandas de frecuencia dependerá del presupuesto que se tenga y el grado de eficacia que se requiera, ya que el caso de 6 bandas de frecuencia nos da mejores resultados (aproximadamente 4 dB más de SINR) pero con un mayor coste ya que se tiene que comprar la licencia del espectro de frecuencia que se utilice, por lo que a mayor número de bandas, mayor será el tamaño del espectro, por lo que mayor será el coste del mismo, por lo que habrá que, para cada implementación, realizar un estudio mas minucioso de las ventajas que puede conllevar el uso de 6 bandas de frecuencia frente al aumento del coste respecto al uso de 4 bandas de frecuencia y tener un SINR de unos 4dB menos.

3 Sistemas UMTS en autopistas

En este capítulo se va a analizar el sistema de comunicaciones móviles UMTS. Después de una breve introducción acerca de esta tecnología y los conceptos claves necesarios para la comprensión del posterior análisis, se va a definir el modelo de propagación y se va a realizar un profundo estudio teórico de la capacidad del enlace ascendente y descendente, sacando conclusiones reales a partir del análisis teórico.

3.1 Introducción de WCDMA

Wideband Code Division Multiple Access (en español Acceso múltiple por división de código de banda ancha) cuyo acrónimo es WCDMA, es una tecnología móvil inalámbrica utilizada en UMTS. Es un sistema de tercera generación, que ofrece velocidades de datos mucho más altas en dispositivos inalámbricos móviles y portátiles que las ofrecidas por el sistema GSM.

WCDMA soporta de manera satisfactoria una tasa de transferencia de datos que va de 45 hasta 384 Kbps para áreas de cobertura amplias, y éstos pueden llegar hasta los 2Mbps de cobertura en áreas locales. Además se basa, para su descripción, en un protocolo formado por varias capas, cada una de ellas con diferentes funciones y servicios, con interfaces para comunicarse entre ellas y con una serie de procesos para conseguir la comunicación entre móviles (transferencia de voz y datos) en una red celular de tercera generación

El estándar que ha surgido con este proyecto de la sociedad 3GPP, se basa en el sistema móvil universal de la telecomunicación de ETSI (UMTS) y se conoce comúnmente como acceso de radio terrestre de UMTS (UTRA). El esquema del acceso para UTRA es el acceso múltiple por división de códigos por espectro expandido en secuencia directa (DS-SS-SS), que se analizará en el apartado 3.1.2. La información se extiende por una ventana de aproximadamente 5 MHz. Este ancho de banda es el que ocupa un canal Wideband CDMA o WCDMA.

UMTS o Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (Universal Mobile Telecommunications System) es una de las tecnologías usadas por los móviles de tercera generación (3G, también llamado WCDMA), que es la sucesora de GSM. Aunque inicialmente esté pensada para su uso en teléfonos móviles, la red UMTS no está limitada a estos dispositivos, pudiendo ser utilizada por otros. Sus tres grandes características son las capacidades multimedia, una velocidad de acceso a Internet elevada, la cual también le permite transmitir audio y video en

tiempo real; y una transmisión de voz con calidad equiparable a la de las redes fijas. Además, dispone de una variedad de servicios muy extensa.

A continuación, se va a realizar una breve definición de lo que son los sistemas móviles, y se van a explicar los conceptos básicos que se utilizan a la hora de realizar los cálculos teóricos en WCDMA.

3.1.1 Los sistemas móviles

El reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), define el servicio móvil como un servicio de radiocomunicaciones entre estaciones móviles y estaciones terrestres fijas, o entre estaciones móviles únicamente.

Los sistemas de radiocomunicaciones móviles permiten el intercambio de información variada, entre terminales a bordo de vehículos o transportados por personas y terminales fijos con unas características de calidad determinadas. En los sistemas móviles se aprovecha plenamente el carácter inalámbrico de las comunicaciones radioeléctricas y la movilidad inherente, logrando enlaces de gran ubicuidad, versatilidad y flexibilidad.

Como en todo sistema de telecomunicación, en los sistemas móviles se transmite además de información de usuario, otra información adicional de señalización, para poder establecer, supervisar y liberar las llamadas, y además para proteger la información de perturbaciones.

La zona de cobertura, es la superficie geográfica dentro de la cual los terminales pueden establecer comunicaciones con una estación fija. Por ello, los sistemas móviles deben diseñarse de tal forma que puedan realizarse enlaces de comunicación desde cualquier lugar de la zona de cobertura. Por ello, hay que elegir cuidadosamente la ubicación de las estaciones fijas. Se denomina enlace descendente (Downlink) al sentido de comunicación de la estación fija al terminal móvil, y enlace ascendente (Uplink) corresponde al sentido de comunicación del terminal móvil a la estación fija.

3.1.2 Acceso múltiple CDMA

La técnica de multiacceso CDMA, otorga a cada canal la totalidad del volumen espectral disponible: toda la anchura de banda, durante todo el tiempo y en toda la zona de cobertura, de forma que permite la transmisión simultánea de varias comunicaciones que emplean los mismos recursos a la vez. De esta manera, los usuarios realizan transmisiones desde la misma zona y utilizando la misma frecuencia portadora, con ocupación de la misma anchura de banda. En consecuencia, se genera una intensa interferencia mutua, por lo que deben establecerse mecanismos para poder extraer cada comunicación individual del conjunto de señales mutuamente interferentes. Ello se realiza mediante la asignación de un código único a cada usuario que se combina con la información transmitida. Este código se debe poder distinguir de los códigos de los demás usuarios, así como de versiones retardadas de él mismo debido a la propagación multitrayecto. Además, debido al problema que conlleva la detección de señales en un entorno de elevada interferencia, se utilizará la técnica de espectro ensanchado mediante la cual se utiliza una gran anchura de banda y una densidad espectral de potencia reducida, con lo que se consigue transmitir la información con una cierta capacidad R (bits/s), con el objetivo de conseguir una determinada probabilidad de error P_e en función de la relación entre la señal deseada/perturbación. Esta tecnología CDMA de espectro ensanchado se llama DS-SS-CDMA (acceso múltiple por división de códigos por espectro expandido en secuencia directa), y es en el que se basa W-CDMA.

Debido a que en CDMA es posible la utilización de la misma frecuencia en todas las células (denominado principio de reutilización universal), en redes celulares con múltiples estaciones base transmisoras (BTS), es donde CDMA despliega todas sus posibilidades y proporciona una gran capacidad.

La característica principal del multiacceso CDMA celular, es la limitación por interferencia, lo que condiciona la capacidad de esta técnica. Esto está vinculado al control de potencia, que se explicará en el siguiente apartado, por lo que en CDMA, el recurso que se distribuye y es el que debe administrarse, es la potencia.

Otra propiedad importante es la posibilidad de realizar el traspaso de llamadas de una célula a otra sin interrupción en la comunicación.

A continuación, vamos a entrar en más detalle en los aspectos característicos antes definidos que influyen en el posterior estudio como son: la limitación por interferencia y la capacidad en WCDMA.

3.1.2.1 Limitación por interferencia en CDMA

La interferencia recibida en la estación base procedente de las estaciones móviles (enlace ascendente) puede provenir:

- De móviles situados dentro de la célula cubierta por esta estación base. A esta componente de interferencia se le llama interferencia intracelular, I_{intra} .
- De móviles situados en células vecinas. En este caso, los valores de interferencia producida por cada estación móvil son menores que en el caso anterior, debido a la mayor distancia entre los móviles, pero en cambio el número de fuentes interferentes es mayor. A esta componente se le llama interferencia intercelular, I_{inter} .

Por otro lado, la interferencia recibida en las estaciones móviles procedentes de las estaciones base (enlace descendente) puede provenir:

- De la estación base de la célula bajo estudio. A esta componente de interferencia se le llama interferencia intracelular, I_{intra} .
- De estaciones base de las células vecinas. En este caso, los valores de interferencia producida por cada estación base son menores que en el caso anterior, debido a la mayor distancia entre estaciones, pero en cambio el número de fuentes interferentes es mayor. A esta componente se le llama interferencia intercelular, I_{inter} .

3.1.2.2 Capacidad de los sistemas CDMA

La capacidad del multiacceso CDMA se especifica como el número de usuarios que pueden ser servidos simultáneamente por una estación base (concepto diferente del de capacidad en Erlang), y depende de la interferencia total recibida. Para una calidad de recepción de información de usuario expresada por una cierta tasa de errores (BER), se requiere que la relación de potencias señal útil/interferencia total (SIR) supere un cierto valor umbral. Como en CDMA se mantiene bajo control la potencia de la señal útil, todo aumento de la interferencia global implica una reducción del SIR, y en consecuencia una degradación de la calidad de la señal. En CDMA, la capacidad es flexible, ya que depende de la interferencia, pudiendo crecer a costa de una degradación de la señal recibida (aumento de la interferencia y de la tasa de error) hasta que, eventualmente, la comunicación deja de ser posible por su mala calidad. Por ello se dice que CDMA es una técnica de multiacceso con capacidad limitada por interferencia. En la práctica se evita llegar a esta condición de comunicación degradada, limitando el número de usuarios simultáneos, lo cual definirá la capacidad del sistema, algo que se estudiará en el apartado 3.3.

La capacidad celular en CDMA es función del enlace, por lo que hay que evaluarla por separada para el trayecto ascendente y para el enlace descendente, como se hará en los apartados 3.3 y 3.4, a fin de ver cual de los dos es el limitante. La capacidad también depende del servicio, por ello se hará un estudio por separado para usuarios que utilicen los servicios de voz o de datos.

En el enlace ascendente, se debe mantener un determinado valor de relación señal/interferencia (SIR) en la estación base. Si hay un cierto número de estaciones móviles conectados que producen un determinado nivel de interferencia y se agregan nuevos móviles, la interferencia aumenta y el mecanismo de control de potencia, que veremos en el siguiente apartado, ordenará a todos los móviles que transmitan con más potencia para mantener el nivel de SIR, hasta que llega el momento en que los móviles no pueden transmitir mas potencia y se alcanzaría el límite en el número de usuarios. No obstante, aún podrían conectarse más si se aceptase un funcionamiento degradado con un valor del SIR menor que el nominal. Por lo tanto, la capacidad no es un valor fijo, si no que depende del número de usuarios, el grado de calidad y la potencia máxima que pueden radiar los móviles.

Además en CDMA, debido a la compartición de carga, la capacidad de cada célula no depende sólo de la interferencia generada en dicha célula, si no de la interferencia producida en las células vecinas.

En el enlace descendente, se distribuye la potencia en la estación base entre los canales de señalización y control y los canales de tráfico conectados a los móviles. El límite de capacidad se alcanza cuando la potencia total solicitada al transmisor para que los móviles puedan funcionar con la SIR nominal, iguala a la máxima potencia disponible. Hay que tener presente que una parte importante y fija de la potencia debe destinarse a los canales piloto y de sincronización, que es necesario radiar para que los móviles puedan efectuar la adquisición y la sincronización. La interferencia que recibe un móvil en el enlace descendente, procede tanto de la estación base propia como de las bases de células adyacentes. Esta última es función de la posición del móvil, como ya veremos cuando analicemos el cálculo de la capacidad del enlace descendente en el capítulo 3.4.2.

Por todo ello, los principios que definen la capacidad en WCDMA son los siguientes:

- La potencia requerida en cada enlace debe ser la estrictamente necesaria para cumplir los requisitos de calidad de la comunicación; relación señal/interferencia o relación energía por bit/densidad de ruido.
- La capacidad es función de las limitaciones de potencia:

- De las estaciones móviles individuales en el enlace ascendente.
- De la estación base en el enlace descendente.

3.1.3 El control de potencia

Si todos los usuarios transmitieran con la misma potencia y existiera un usuario interferente más próximo al receptor que el usuario de referencia, su potencia recibida sería mayor, con lo que la interferencia sería muy grande, reduciendo la relación señal/interferencia para el usuario de referencia y degradando la calidad de la señal percibida por este. De una manera general, se puede ver que si unas señales se reciben con mucho mayor nivel que otras, la calidad para estas últimas se degrada enormemente. Para equilibrar la relación señal/interferencia de todas las comunicaciones, deben controlarse las amplitudes recibidas de manera que todas tengan valores parecidos, lo que implica un control estricto de las potencias de transmisión de los usuarios. Además se debe tener en cuenta el tipo de servicio que requiere el usuario, ya que se necesitaría diferentes relaciones señal/interferencia para un mismo grado de calidad final, por lo que se deberán ajustar los niveles de señal recibida dependiendo de las necesidades.

Por todo ello, surge la necesidad de un mecanismo de control de potencia que trate de conseguir los valores deseados en recepción. Además, este mecanismo debe ser dinámico para adaptarse a las condiciones cambiantes de propagación y de carga del sistema.

El objetivo del control de potencia es que, en el enlace ascendente móvil-base, las señales se reciban con un nivel similar e igual a un valor objetivo que depende de la calidad requerida para cada comunicación y de las condiciones de propagación. El control de potencia debe asegurar un equilibrio entre la interferencia producida y sufrida. Si un móvil llega con un alto nivel a la base, la calidad de su comunicación será muy buena pero interferirá en exceso y producirá una reducción de la calidad de recepción de otros móviles. Con un control de potencia ideal en el enlace ascendente, la potencia total recibida en la base es igual a la potencia nominal multiplicada por el número de móviles.

En el enlace descendente, base-móvil, la estación base regula también la potencia radiada hacia el móvil, proporcionando mayores niveles a los móviles más alejados que pueden sufrir una interferencia más intensa desde otras estaciones base.

Debido a la variabilidad temporal del canal radio, el control de potencia debe ser dinámico, es decir, debe actualizarse con un tiempo menor o igual al tiempo de coherencia del canal que

depende de la dispersión Doppler, y en consecuencia depende de la velocidad máxima de los móviles. La frecuencia de control de potencia en UMTS es de 1500Hz (veces/segundo).

El control de potencia es más importante en el enlace ascendente que en el descendente. En el caso del enlace descendente, la señal emitida por la estación base es una suma de componentes de radiofrecuencia, cada una de las cuales está destinada a un determinado usuario, más una componente de señal piloto. Todas estas señales multiplexadas se desvanecen simultáneamente. El control de potencia aplicado a la componente destinada a cada usuario debe compensar el desvanecimiento de la señal recibida por este usuario así como contrarrestar los efectos de las interferencias recibidas por dicho usuario desde otras estaciones base. Estas señales interferentes experimentarán desvanecimientos que son independientes de la señal deseada.

Como la potencia total radiada por la base debe ser constante, también debe serlo la suma de las potencias de las componentes, lo cual repercute en el número máximo posible de usuarios y en el reparto de potencias entre los móviles activos conectados a una base.

En el enlace ascendente, el control de potencia debe contrarrestar los desvanecimientos de las señales de los usuarios y asegurar un valor mínimo de la relación SIR. Ello implica que si crece el número de usuarios móviles en la célula, aumentará la interferencia, por lo que los móviles deberán incrementar su potencia, hasta un límite igual a la máxima potencia del móvil. Una vez alcanzado este valor, si se le solicita más potencia, no podrá darla, por lo que se intentará traspasarla a otra célula que necesite menos potencia, y si esto no es posible se cortará la llamada.

3.1.4 Bandas de frecuencia de WCDMA

El estándar W-CDMA utiliza canales de radio con un ancho de banda de 5 MHz tanto en el enlace ascendente como en el descendente, y hace una utilización muy eficiente del espectro radioeléctrico consiguiendo alcanzar un flujo de datos de hasta 2 Mbit/s en áreas locales, que queda reducido a 384 kbit/s en áreas de gran extensión, como ya dijimos anteriormente.

El rango de frecuencias para el enlace ascendente, es de 1920 a 1980 MHz, mientras que para el enlace descendente, el rango de frecuencias es de 2110 a 2170 MHz. En ambos enlaces, la separación duplex o separación entre canales es de 190MHz, teniendo un total de 12 canales.

Ahora se va a analizar el modelo de propagación, que nos sirve tanto para el enlace ascendente como para el descendente. El motivo por el que se vuelve a repetir este apartado, es que se quiere realizar un análisis de cada una de las tecnologías por separado, atendiendo a una posible demanda de alguno de los capítulos de forma independiente.

3.2 Modelo de Propagación

Debido al rápido e ininterrumpido crecimiento de los sistemas de comunicaciones móviles, la utilización de nuevas tecnologías y la extensión de su ámbito de aplicación, se ha producido una evolución paralela de los métodos empleados en caracterizar la propagación por canales móviles, así como de predecir sus efectos. En este contexto, se deben destacar 3 aspectos fundamentales:

- La cobertura zonal: implica la realización de predicciones de propagación entre el transmisor y un elevado número de puntos en el área de cobertura.
- La multiplicidad de trayectos entre el transmisor y el receptor.
- La variabilidad de los trayectos, debido al desplazamiento de los terminales móviles, lo que supone una variación con la distancia y el tiempo, y en consecuencia del nivel de la señal recibida.

Para calcular la capacidad del sistema W-CDMA en las autopistas se va a utilizar un modelo basado en la propagación sobre la tierra plana en el que están presentes dos exponentes de propagación diferentes para dos tramos, como se puede ver en la Figura 3.1, en los cuales, para cada uno de los tramos, se dará el valor medio de pérdidas de propagación más el efecto de shadowing que se representa por una distribución Log-normal.

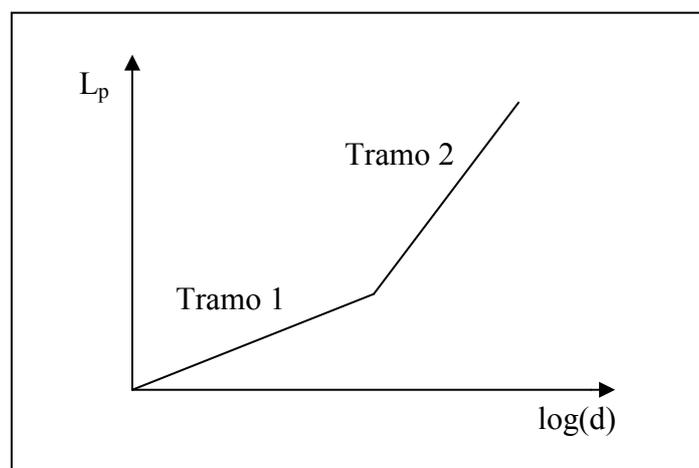


Figura 3-1: Modelo basado en la propagación sobre la tierra plana. Dos tramos, cada uno con un exponente de propagación

El exponente de propagación del primer tramo se denomina s_1 y está presente hasta el punto de corte conocido también como R_b , a partir de este punto se pasa a hablar del exponente de propagación s_2 .

Las pérdidas ocasionadas serán un aspecto muy relevante en el estudio de la capacidad del número de usuarios. A ello hay que añadir el estudio de la región de cobertura (llamado también R en el análisis llevado a cabo).

En primer lugar, se van a definir las pérdidas de propagación [1]:

$$\begin{cases} L_p (dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + \xi_1, & \text{si } r \leq R_b \\ L_p (dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + \xi_2, & \text{si } r > R_b \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} L_p (dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + \xi_1, & \text{si } r \leq R_b \\ L_p (dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + \xi_2, & \text{si } r > R_b \end{cases} \quad (3.2)$$

Las pérdidas básicas “ L_b ” y el punto de ruptura “ R_b ” vienen dadas por las siguientes fórmulas:

$$L_b (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10s_1 \log_{10} (R_b) \quad (3.3)$$

$$R_b \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda} \quad (3.4)$$

Donde,

- h_b es la altura de la antena de la estación base.
- h_m es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario.
- λ es la longitud de onda.
- ξ_1 y ξ_2 son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar σ_1 y σ_2 respectivamente.

A continuación se exponen los valores más comunes de los exponentes de propagación y las desviaciones estándar para microceldas del tipo Cigar-Shaped:

$$s_1 = 1.75 \text{ a } 2.25$$

$$s_2 = 4 \text{ a } 5$$

$$\sigma_1 = 2 \text{ a } 3 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 4 \text{ a } 6 \text{ dB}$$

3.3 La capacidad del enlace ascendente

A continuación, se va a analizar con detalle el enlace ascendente en los sistemas WCDMA.

3.3.1 Introducción al enlace ascendente en WCDMA

Para la realización del estudio de la capacidad del enlace ascendente en W-CDMA, nos basaremos en el estándar CDMA, explicado en el apartado 3.1.2. Este se caracteriza por tener interferencia limitada, por lo que reduciendo las interferencias se conseguirá incrementar la capacidad.

Existen tres técnicas para reducir las interferencias:

- Control de Potencia (PC), que es esencial para el Uplink y puede duplicar la capacidad de DownLink.
- Monitoreo de la actividad de voz, que puede incrementar la capacidad en un 50% (asumiendo un factor de actividad del 0.66).
- La sectorización que puede duplicar fácilmente la capacidad de las macroceldas utilizando tres sectores.

La forma de una microcelda urbana sigue el patrón de la forma de una calle; fundamentalmente serán microceldas con forma de Cigar-Shaped (forma de cigarro dicho de forma coloquial).

Las características que describen las microceldas utilizadas en entornos rurales para autopistas son las siguientes:

- El número de sectores direccionales de las micro celdas Cigar-Shaped es dos y se utiliza una antena direccional en cada sector.
- Cada sector tiene un rango de 1 a 1.5 km.
- La velocidad del usuario en zonas rurales puede alcanzar los 120 Km/h (El usuario podrá desplazarse en coche o en tren).

Para demostrar el rendimiento de la utilización de CDMA en microceldas de autopistas o carreteras en zonas urbanas, se recurrirá a un modelo que tiene en cuenta la esperanza y la varianza de la interferencia.

Además, se debe tener en cuenta que el control de potencia es imprescindible en CDMA cuando se utiliza el receptor convencional de correlación o el filtro adaptado a la señal deseada, para evitar que ésta resulte afectada en exceso por la interferencia producida por señales recibidas con más intensidad (efecto cerca-lejos) puesto que la potencia emitida por un usuario para su enlace es interferencia para los demás.

El objetivo del control de potencia es que, como ya dijimos en el apartado 3.1.3, en el enlace ascendente móvil-base, las señales se reciban con un nivel similar e igual a un valor objetivo que depende de la calidad requerida para cada comunicación y las condiciones de propagación. El control de potencia debe asegurar un equilibrio entre la interferencia producida y sufrida (la interferencia siempre es bilateral).

Si un móvil llega con alto nivel a la base, la calidad de su comunicación será muy buena, pero interferirá en exceso y producirá una merma de la calidad de recepción de otros móviles.

El algoritmo del error de control de potencia puede estar basado en la medida de potencia recibida o en la relación señal/interferencia. Esta última opción es más efectiva, por lo que es la que se utiliza habitualmente, y con la que se va a trabajar.

Para la evaluación de la capacidad del enlace ascendente, se adoptan las siguientes hipótesis:

1. Las estaciones móviles están repartidas de modo uniforme en todas las células. En consecuencia, la interferencia también se distribuye de forma análoga.
2. El número de estaciones móviles es lo suficientemente elevado como para considerar que la interferencia que producen sobre la estación base es de tipo gaussiano.
3. El desvanecimiento de Rayleigh se combate mediante diversidad, codificación con entrelazado y control de potencia, de forma que no se tiene en cuenta su influencia.
4. Control de potencia ideal, tanto en la célula de referencia como en las adyacentes: todas las estaciones móviles de una célula se reciben en su estación base con la misma potencia.
5. Cada estación móvil está conectada a la “mejor” estación base transmisora, de forma que su potencia de transmisión está optimizada y el traspaso entre células es perfecto.

La interferencia recibida en la estación base procedente de las estaciones móviles puede provenir:

- De estaciones situadas dentro de la célula cubierta por esta estación base. A esta componente de interferencia se le llama interferencia intracelular, I_{intra} .
- De estaciones situadas en células vecinas. En este caso, los valores de interferencia producida por cada estación móvil son menores que en el caso anterior, debido a la mayor distancia entre estaciones, pero en cambio el número de fuentes interferentes es mayor. A esta componente se le llama interferencia intercelular, I_{inter} .

En el siguiente apartado, vamos a analizar la esperanza y la varianza de dichas interferencias, y haremos un cálculo teórico de la relación señal/interferencia, que nos servirá para sacar conclusiones gráficas de la capacidad del enlace ascendente de WCDMA.

3.3.2 Análisis del enlace ascendente

La Figura 3.2, muestra la configuración de un modelo formado por cinco microceldas (cada una de ellas dividida en dos sectores). En este modelo se basará el esquema a seguir para la realización de los cálculos, donde se hace un análisis de la capacidad en el enlace ascendente (Uplink).

Es importante destacar que cada microcelda controla la potencia transmitida de cada uno de los usuarios. Se asume que el rango del sector será R (por lo que el tamaño de la microcelda es de $2R$).

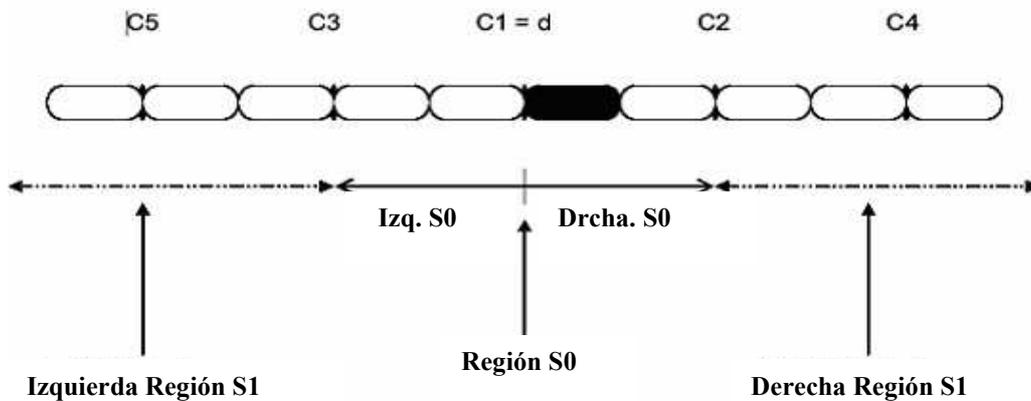


Figura 3-2: Modelo de 5 microceldas

Según la Figura 3.3, se define dos distancias desde el usuario a ambas estaciones base: r_{im} y r_{id} , siendo r_{im} la distancia de la estación base bajo estudio al móvil, y r_{id} la distancia de la estación base interferente al móvil.

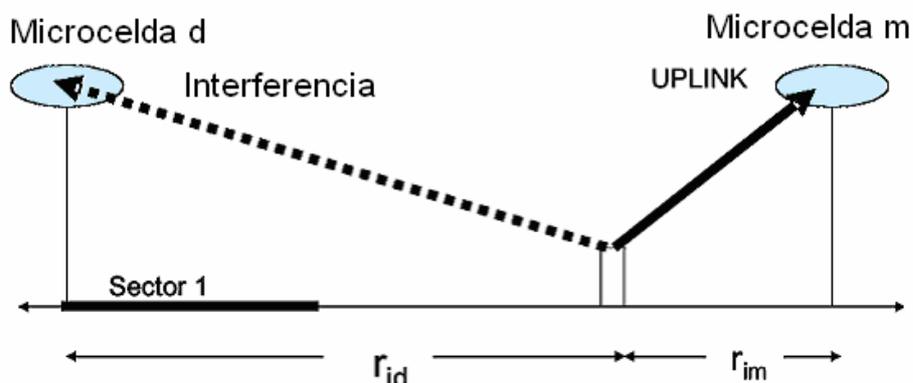


Figura 3-3: Microcelda “d” a la que generará interferencia y Microcelda “m” con la que establecerá comunicación

La interferencia normalizada $L(r_{id}, r_{im})$ debido a la distancia, viene dada por las siguientes fórmulas (dependiendo del valor de estas distancias respecto a R_b , el punto de ruptura):

- Si r_{id} y $r_{im} < R_b$ (caso impracticable):

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left(\frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (3.5)$$

- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{im} < R_b$:

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_2-s_1)} \left(\frac{r_{im}^{s_1}}{r_{id}^{s_2}} \right) \quad (3.6)$$

- Si $r_{id} < R_b$, pero $r_{im} > R_b$:

$$L(r_{id}, r_{im}) = R_b^{(s_1-s_2)} \left(\frac{r_{im}^{s_2}}{r_{id}^{s_1}} \right) \quad (3.7)$$

- Si r_{id} y $r_{im} > R_b$:

$$L(r_{id}, r_{im}) = \left(\frac{r_{im}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (3.8)$$

Estos cálculos tienen solo en cuenta la distancia. Si se quiere calcular la interferencia $I(r_{id}, r_{im})$ debido a la distancia y al shadowing, se deberá usar la siguiente fórmula:

$$I(r_{id}, r_{im}) = 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} L(r_{id}, r_{im}) \quad (3.9)$$

Siendo,

- Si r_{id} y $r_{im} < R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_1$ y $\xi_{im} = \xi_1$
- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{im} < R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{im} = \xi_1$
- Si $r_{id} < R_b$, pero $r_{im} > R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_1$ y $\xi_{im} = \xi_2$
- Si r_{id} y $r_{im} > R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{im} = \xi_2$

Con las dos figuras anteriores (Figuras 3.2 y 3.3), se pretende explicar de una manera más clara la situación en la cual nos encontramos. En cada uno de los diez sectores, el diagrama de radiación estará formado por un lóbulo principal y lóbulos secundarios, que se medirán con el parámetro de “nivel de lóbulos secundarios” o Sll.

Para una mayor claridad, se dividirá la interferencia total en la interferencia de los usuarios en la región S0 (I_{s_0}) y en la región S1 (I_{s_1}), ambas regiones se pueden ver en la Figura 3.1.

A continuación, se va a calcular los estadísticos de la capacidad y la interferencia del sector derecho (sector 1) de la estación base asumiendo que se está en la microcelda d.

Se asume también que los usuarios que estén en las regiones S0 y S1, se conectarán con la mejor de las dos microceldas más cercanas. Por lo tanto, usuarios en S1 no podrán comunicarse con la estación base C1 (Figura 3.2).

La potencia de la señal es P_r , y, la interferencia de un usuario activo comunicándose con la microcelda es también P_r .

Un usuario i que está en la región S0 no puede comunicarse con la estación base d, pero si puede con la estación base m si:

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im}) = 1 \quad (3.10)$$

Siendo,

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im}) = \begin{cases} 1, & \text{si } L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, & \text{en el resto} \end{cases} \quad (3.11)$$

Como se verá a continuación, se va a considerar una probabilidad de desbordamiento del 1% y se va a calcular la capacidad de los sectores para dicha probabilidad, a partir del cálculo teórico.

La Figura 3.4, nos muestra un ejemplo del caso bajo estudio. En nuestros cálculos englobamos tanto a situaciones en las que pueda existir más de un carril para cada sentido de desplazamiento, tanto como carreteras rurales de un solo carril en cada sentido.



Figura 3-4: Ejemplo de autovía donde se puede llevar a cabo el estudio

Asumiendo una densidad de usuarios uniforme, la densidad de usuarios (usuarios por unidad de longitud) para cada sector viene dada por:

$$\rho_s = \frac{N_u}{R}$$

Basándonos en las fórmulas desarrolladas en [1], se va a pasar a calcular la esperanza y varianza de la interferencias intracelular (provocada por usuarios que están en la misma microcelda) y la interferencia intercelular (provocada por usuarios que se encuentran en otras microceldas) de cada una de las regiones representadas.

El valor de la esperanza de la interferencia ocasionada por la parte derecha de la región S_0 viene dada por:

$$E[I_{s_0}]_r \approx \alpha_s \rho_s \int_{s_0} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) dr \quad (3.12)$$

Donde,

$$\begin{aligned}
 f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E \left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im}) \right] = \\
 &= e^{(\beta\sigma)^2/2} Q \left[\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10} \{1 / L(r_{id}, r_{im})\} \right]
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Siendo $\beta = \ln(10)/10$, y α el factor de actividad del usuario (para voz es 0.63 y para datos 1).

El valor de σ_2 , viene dado por:

- Cuando r_{id} y $r_{im} < R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_1$ y $\sigma_{im} = \sigma_1$:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_1^2 \tag{3.14}$$

- Cuando $r_{id} < R_b$ y $r_{im} > R_b$ ó $r_{id} > R_b$ y $r_{im} < R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_1$ y $\sigma_{im} = \sigma_2$:

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{dm})\sigma_1\sigma_2 \tag{3.15}$$

- Cuando r_{id} y $r_{im} > R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_2$ y $\sigma_{im} = \sigma_2$:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{dm})\sigma_2^2 \tag{3.16}$$

Para el cálculo de la esperanza, utilizamos la función matemática $Q(x)$, que representa la cola de probabilidad de una distribución Gaussiana, y viene dada por la siguiente expresión,

$$Q(x) = \int_x^{\infty} e^{-v^2/2} dv / \sqrt{2\pi} \tag{3.17}$$

A su vez, el valor de esperanza de la interferencia ocasionada por la parte derecha de la región S1, viene dada por:

$$E[I_{s1}]_{r,s} \approx \alpha_s \rho_s \int_{s1} L(r_{id}, r_{im}) E[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10}] dr \quad (3.18)$$

Por lo tanto, el valor de la esperanza de la interferencia intracelular debida a la parte derecha de la región S0 y S1 es:

$$E[I]_{r,s} = E[I_{s0}]_{r,s} + E[I_{s1}]_{r,s} \quad (3.19)$$

La señal de interferencia de la parte izquierda de las zonas S0 y S1 que llega a la antena del sector bajo estudio, se calcula gracias a los lóbulos secundarios de la siguiente manera:

$$E[I]_{inter,s} = E[I]_{r,s} (1 + Sll) \quad (3.20)$$

Siendo Sll el nivel del lóbulo lateral de la antena direccional usada en cada sector.

Además de la media de la interferencia, se va a calcular la potencia interferente tanto intercelular como intracelular de la siguiente manera:

$$E[P]_{inter,s} = P_{r,s} E[I]_{inter,s} \quad (3.21)$$

$$E[P]_{intra,s} = P_{r,s} E[I]_{intra,s} \approx P_{r,s} \alpha_s N_{u,s} (1 + Sll) \quad (3.22)$$

Teniendo en cuenta el control imperfecto de potencia, que tiene un error de desviación estándar σ_c (dB), la potencia interferente total será:

$$E[P_{intf}]_{t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2} (E[P]_{intra,s} + E[P]_{inter,s}) \quad (3.23)$$

También se puede calcular la potencia total interferente usando “the soft handoff, ψ ” de los usuarios del sector que están en conexión con más de una estación base. En este caso, el valor esperado de potencia interferente será:

$$E[P_{intf}]_{t,s} = K_{SHO} e^{\beta\sigma_c^2/2} (E[P]_{intrqs} + E[P]_{intrs}) \quad (3.24)$$

Siendo el parámetro K_{SHO} el factor de reducción de interferencia dado por la siguiente fórmula:

$$K_{SHO} = (1 - \psi) + \frac{\psi}{G_{SHO}} \quad (3.25)$$

Y siendo G_{SHO} la ganancia de “soft handoff”, que suele tener un valor entre 0.93 y 0.98.

La esperanza de la potencia total interferente para múltiples servicios viene dada por:

$$E[P_{intf}]_t = \sum_{s=1}^M E[P_{intf}]_{t,s} \quad (3.26)$$

En nuestro caso, como máximo se hablará de dos servicios (voz y datos), por tanto ‘M’ alcanzará para el sistema multiservicio el valor dos.

A continuación se expresan las fórmulas correspondientes a la varianza de la interferencia debido al lado derecho de las regiones S0 y S1, las cuales está directamente relacionadas con la desviación estándar:

$$\text{var}[I_{S0}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p \alpha_s g\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - q \alpha_s f^2\left(\frac{r_d}{r_m}\right) \right\} dr \quad (3.27)$$

Donde,

$$\begin{aligned} g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) &= E \left[10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id} / r_{im}) \right]^2 = \\ &= e^{2(\beta\sigma)^2} Q \left[2\beta\sqrt{\sigma^2} - \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10} \{1 / L(r_{id} / r_{im})\} \right] \end{aligned} \quad (3.28)$$

Por otro lado, la varianza del lado derecho de la región S1 queda de la siguiente manera:

$$\text{var}[I_{S1}]_{r,s} \approx \rho_s \int_{S1} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ p\alpha_s E[(10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10})^2] - \right. \\ \left. - q\alpha_s^2 E^2[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10}] \right\} dr \quad (3.29)$$

Donde,

$$p = e^{2\beta^2\sigma_c^2} \quad (3.30)$$

$$q = e^{\beta^2\sigma_c^2} \quad (3.31)$$

Por lo cual, teniendo en cuenta ambas regiones, y añadiéndole el efecto del lado izquierdo de las regiones S0 y S1 gracias a los lóbulos secundarios, la varianza total de la potencia intercelular queda de la siguiente manera:

$$\text{var}[I]_{inter,s} = \{\text{var}[I_{S0}]_{r,s} + \text{var}[I_{S1}]_{r,s}\}(1 + SII) \quad (3.32)$$

Y la de la varianza intracelular,

$$\text{var}[I]_{intra,s} = Nu(1 + SII)(p\alpha_s - q\alpha_s^2) \quad (3.33)$$

Por lo que, la varianza de la interferencia total, teniendo en cuenta tanto la interferencia intercelular como la intracelular, será la suma de ambas:

$$\text{var}[I]_{t,s} = \text{var}[I]_{inter,s} + \text{var}[I]_{intra,s} \quad (3.34)$$

La varianza de la potencia interferente total quedará como,

$$\text{var}[P]_{t,s} = P_{r,s}^2 \text{var}[I]_{t,s} \quad (3.35)$$

En caso de tener múltiples servicios, la varianza de la potencia interferente total será,

$$\text{var}[P_{intf}]_t = \sum_{s=1}^M \text{var}[P]_{t,s} \quad (3.36)$$

En nuestro caso, sólo se tiene los servicios de voz y datos, por lo que el sumatorio se reducirá a dos términos.

En la demodulación del uplink, se usa únicamente εP_r de P_r (teniendo ε un valor de $15/16=0.9375$). Por tanto, el valor esperado de la relación portadora- interferencia del uplink es:

$$\left[\frac{C}{I} \right]_s = \frac{\varepsilon P_{r,s}}{E[P_{intf}]_t + P_N + \kappa \sqrt{\text{var}[P_{intf}]_t}} \quad (3.37)$$

Siendo P_n la potencia de ruido recibida.

Además, el valor esperado de $(E_b/N_o)_{up}$ es:

$$\left[\frac{E_b}{N_o} \right]_s = \left[\frac{C}{I} \right]_s G_{p,s} \quad (3.38)$$

Donde $G_{p,s}$ es la ganancia de procesamiento.

Algo que es de vital importancia para el desarrollo del proyecto, es la probabilidad de desbordamiento (o de supervivencia), que se define mediante la siguiente ecuación:

$$P_{out} = Q \left[\frac{E(P)_{t,s|N_u=N_{uMEDIO}} - E(P)_{t,s|N_u=N}}{\sqrt{\text{var}(P)_{t,s|N_u=N}}} \right] \quad (3.39)$$

Por otro lado, el factor F se calcula como,

$$F = \frac{\text{InterferenciaIntercelular}}{\text{InterferenciaIntracelular}} = \frac{E[P]_{inter,s}}{E[P]_{intra,s}} \quad (3.40)$$

Finalmente, se va a definir la potencia interferente efectiva, mediante la siguiente ecuación:

$$[P_{intf}]_{eff} = E[P_{intf}]_t + \gamma \left(\sqrt{\text{var}[P_{intf}]_t} \right) \quad (3.41)$$

Siendo γ el factor de desviación, que es función de la probabilidad de desbordamiento. Su valor práctico es de 2.06 para un desbordamiento del 2% y de 2.33 para un desbordamiento de 1%.

3.3.3 Resultados de la capacidad del enlace ascendente de WCDMA

A continuación se va a ver, a partir de los cálculos teóricos mostrados en los apartados 3.2.1 y 3.2.2, los resultados gráficos que definirán el comportamiento de nuestro modelo de propagación.

Nos centraremos primero en observar la probabilidad de desbordamiento tanto para usuarios de voz, como usuarios de datos y para el caso en el que se tenga usuarios que hagan uso de los servicios de voz y datos a la vez.

También se verá como influyen determinados parámetros en la capacidad del sistema.

Los valores de los parámetros utilizados serán:

$G_{p_voz} = 256$	$s_2 = 4$
$G_{p_datos} = 26.66$	$\sigma_1 = 3 \text{ dB}$
$SLL = -15 \text{ dB}$	$\sigma_2 = 6 \text{ dB}$
Frecuencia = 1950 MHz	$G_{tx} = 0 \text{ dB}$
$\alpha_{datos} = 1$	$G_{rx} = 12 \text{ dB}$
$\alpha_{voz} = 0.63$	$P_{tx_voz} = 18.6 \text{ dBm}$
$s_1 = 2$	$P_{tx_datos} = 25 \text{ dBm}$

Tabla 3-1. Valores de los parámetros para el enlace ascendente de WCDMA

Además de estos datos, existen otros parámetros cuyos valores numéricos se irán viendo a lo largo del desarrollo práctico.

Se desarrollará cada gráfica con tres líneas, cada una de ellas para diferentes valores del error del control de potencia. Dichas líneas serán para los siguientes valores del error de control de potencia “ σ_c ”: 0.75, 1 y 1.25 dB.

El valor de la potencia de ruido del receptor estará definido por el parámetro “ P_n ” y tendrá un valor igual a -100 dBm.

En un principio, también se fijará el rango del sector “R” a 1000 metros. Como este parámetro puede variar dependiendo del escenario en el que nos encontremos, se verá en un apartado como influye la variación del rango del sector en el número de usuarios a los que se puede dar el servicio.

Otro parámetro fijo durante todo el desarrollo es la tasa de SNR (Signal Noise Rate) deseado, que tiene diferente valor dependiendo de si los usuarios son de datos o de voz. Estos valores del SNR deseado son: 7 dB para voz y de 2.5 dB para datos [4].

Otro punto destacable y que se debe tener en cuenta es que se representa una situación real, en la cual existe limitación de potencia de transmisión.

3.3.3.1 Capacidad del sistema con $R=1\text{Km}$ para todos los sectores

Lo primero que se va a analizar es la capacidad (número de usuarios por sector) dada una probabilidad de desbordamiento del 1%. Primero se verá para usuarios de datos y de voz por separado, y después se observará una gráfica para usuarios que hacen uso conjunto de voz y datos.

Se va a fijar el valor del tamaño del sector “R” a 1 Km, y el punto de corte “ R_b ” a 300 metros. Los valores de los demás parámetros son los fijados anteriormente.

Para todas las gráficas, se utilizará una resolución de 0.5 usuarios en el caso de los usuarios de voz y de 0.1 usuarios para usuarios de datos.

Se obtendrán 3 gráficas en cada apartado, una para usuarios de voz, otra para usuarios de datos, y otra para usuarios mixtos, de voz y de datos.

➤ Para usuarios de voz:

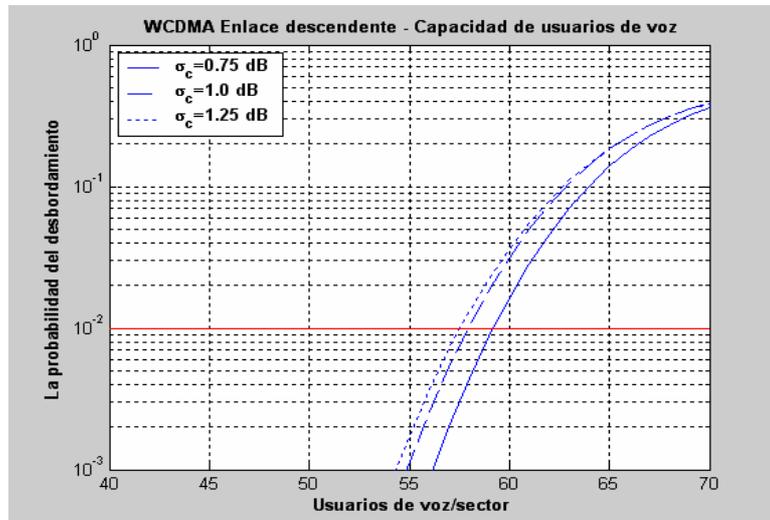


Figura 3-5: Capacidad de usuarios de voz con R fijo a 1Km

Como se puede ver, el control de potencia es determinante para la capacidad. Para una probabilidad de desbordamiento del 1% (representado por la línea horizontal roja), se tienen diferentes valores de capacidad dependiendo del valor del error de control de potencia.

Por ejemplo, para un valor de σ_c de 0.75 dB, la capacidad es de aproximadamente 59 usuarios de voz, mientras que para un valor de σ_c de 1.25 dB, la capacidad es menos de 57 usuarios de voz.

Otro factor importante es el radio del sector; si por ejemplo se cambia a 1500 metros, se obtendrían unos peores resultados, no llegando a 52 usuarios de voz para una probabilidad de desbordamiento del 1% y un control de potencia con σ_c de 0.75 dB.

Teniendo esto en cuenta, dependiendo de lo que se necesite en el caso práctico, convendrá situar las antenas a más distancia a costa de perder algún usuario (si por ejemplo nos encontráramos en una zona rural, donde el número de usuarios es menor).

En cambio, si estuviéramos en una zona con alta densidad de usuarios, convendría gastarse más dinero en antenas y en estaciones base para poder dar servicio a más usuarios.

➤ Para usuarios de datos:

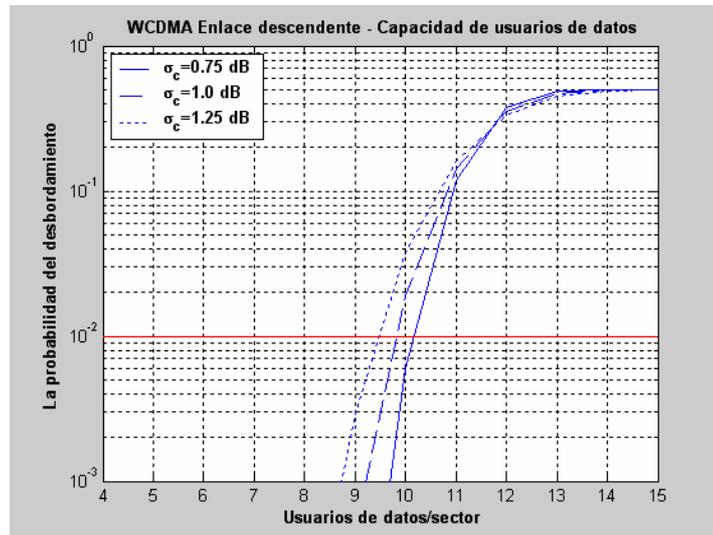


Figura 3-6: Capacidad de usuarios de datos con R fijo a 1Km

Para usuarios de datos, teniendo una probabilidad de desbordamiento del 1%, y para un valor de σ_c de por ejemplo 0.75 dB, se puede tener 10 usuarios de datos en cada sector, mientras que para un valor de σ_c de 1.25 dB se tiene 9 usuarios de datos.

En este caso, si se aumenta el tamaño del sector a 1500 metros, sólo disminuiría la capacidad en un usuario por sector. Se debería aumentar más la distancia, a por ejemplo 2000 metros, para obtener una disminución de usuarios por sector (quedándose en 4 usuarios por sector para una probabilidad de desbordamiento del 1%). Esto se verá más claro a continuación, cuando se vea la capacidad del sector dependiendo del rango del sector “R”.

➤ Para usuarios conjuntos de voz y datos:

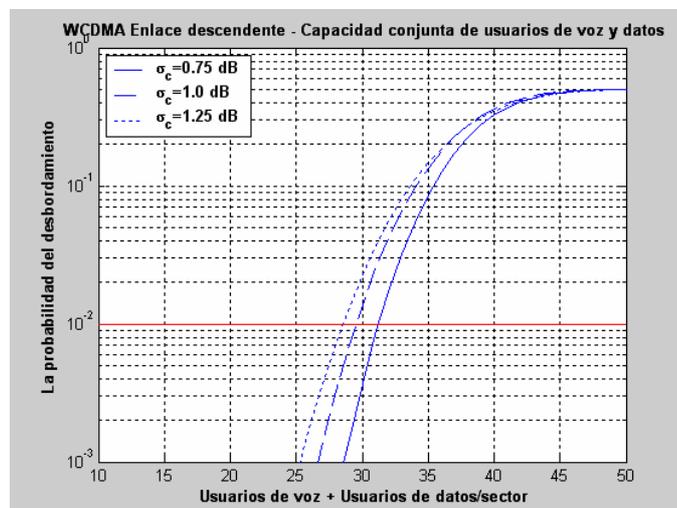


Figura 3-7: Capacidad de usuarios de voz + datos con R fijo a 1Km

Para un número de usuarios de datos fijo de 5 usuarios, se obtiene como se puede ver en la Figura 3.7 que, para una probabilidad de desbordamiento del 1%, y para un valor de σ_c de 0.75 dB, el número de usuarios por sector es, aproximadamente, 31 usuarios de voz y 5 usuarios de datos. Para un valor de σ_c de 1.25 dB, la capacidad baja a 28 usuarios de voz y 5 usuarios de datos.

De la misma manera que para el caso en el que se tiene únicamente usuarios de datos, el rango del sector influye en la capacidad, reduciendo en aproximadamente la capacidad en 2 usuarios si se aumenta el rango del sector “R” a 2000 metros.

Ahora, se va a tener en cuenta que cada sector de nuestro modelo, puede tener un tamaño diferente, ya que algunos tramos de la autopista pueden tener más ruido ambiental, o variar el trazado de la misma.

3.3.3.2 Capacidad del sistema variando R para cada sector

Se debe tener en cuenta, que el radio de los sectores tienen que ser iguales dos a dos, es decir, si entre dos antenas, la distancia es de 2000 metros, la mitad de esta distancia será el valor que tendrá el radio de estos dos sectores, tal y como se ve en la siguiente figura:

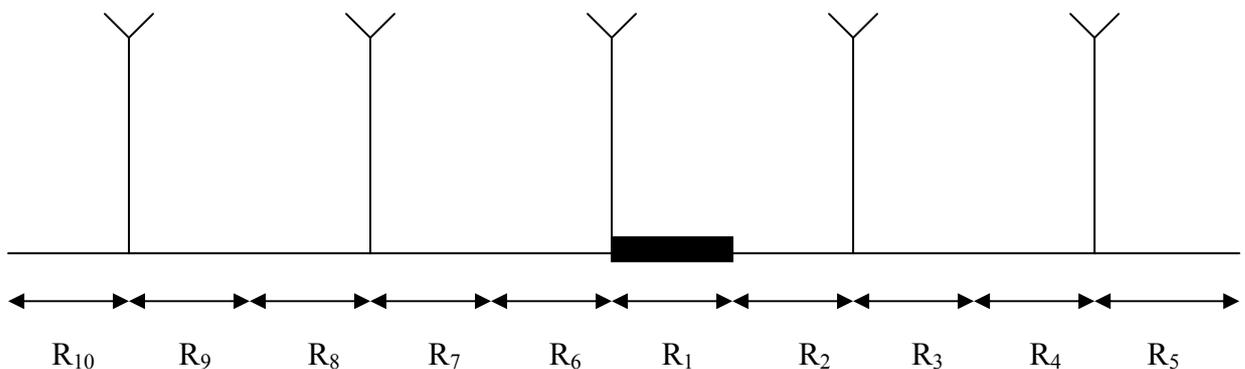


Figura 3-8: Situación del escenario, teniendo un R diferente para cada sector

En este caso, en el que hay 10 sectores (ya que se está en el modelo de 5 microceldas definido en el apartado 3.2.2), los valores que damos a $R_1=R_2$, $R_3=R_4$, $R_6=R_7$, y R_5 y R_{10} pueden ser cualquiera, pero será la mitad de la distancia que haya con la siguiente antena (en cada sector).

Los demás valores de los parámetros permanecerán con los valores antes definidos menos el radio de cada sector, que serán los siguientes (todos ellos entre 800 y 1200 metros):

$R_1=1200\text{m}$
 $R_2=1200\text{m}$
 $R_3=900\text{m}$
 $R_4=900\text{m}$
 $R_5=800\text{m}$
 $R_6=1200\text{m}$
 $R_7=1200\text{m}$
 $R_8=1100\text{m}$
 $R_9=1100\text{m}$
 $R_{10}=800\text{m}$

Con estos datos, se va a analizar los 3 casos anteriores: voz, datos y voz+datos conjunto.

➤ **Para usuarios de voz:**

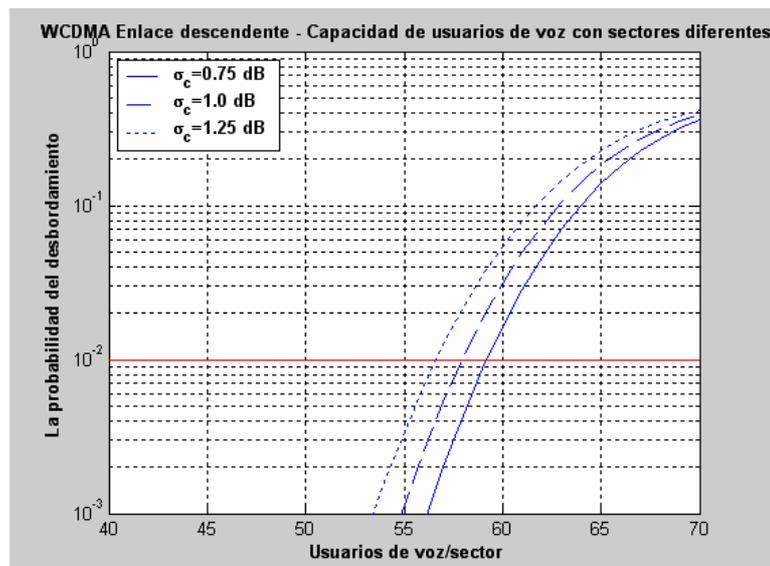


Figura 3-9: Capacidad de usuarios de voz con rango de los sectores diferentes

Como se puede ver en la Figura 3.9, no se aprecia una gran diferencia en la capacidad por sector respecto al caso en el que R es constante a 1000 metros, pero esto dependerá de los valores que le de a cada sector.

Si se dan valores a todos los sectores muy altos, si se aprecia una mayor variación en la capacidad. Por ejemplo, los valores del radio de cada sector podrían ser:

$R_1=2000\text{m}$
 $R_2=2000\text{m}$
 $R_3=1800\text{m}$
 $R_4=1800\text{m}$
 $R_5=1600\text{m}$
 $R_6=2000\text{m}$
 $R_7=2000\text{m}$
 $R_8=1800\text{m}$
 $R_9=1800\text{m}$
 $R_{10}=1700\text{m}$

Como se puede ver en la Figura 3.10, con estos parámetros de los rangos de los sectores, si se nota más la diferencia en la capacidad, disminuyendo en más de 10 usuarios por sector.

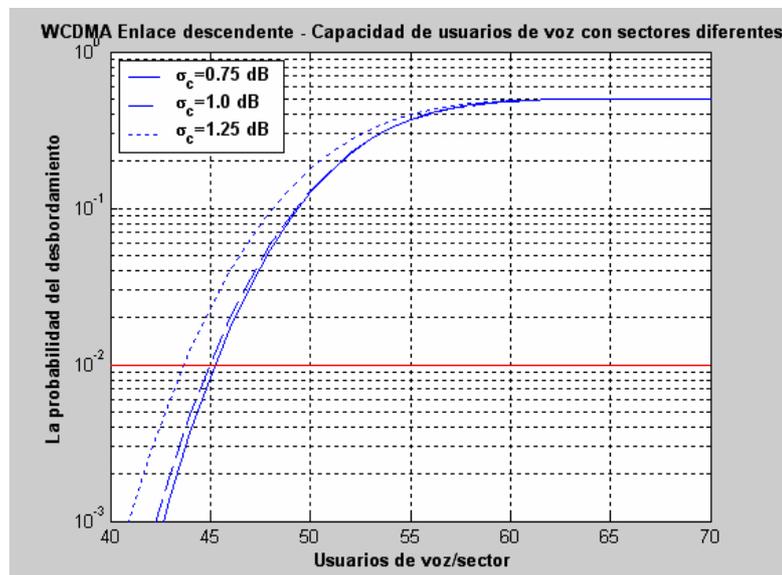


Figura 3-10: Capacidad de usuarios de voz con rango de los sectores grande

Como ya se dijo anteriormente, el rango del sector es un factor importante en la capacidad. Este rango dependerá (en la práctica), de las necesidades que se tenga. Si es una zona en la que no hay mucho tráfico, se puede separar un poco más las antenas a costa de perder algún usuario. Si en cambio, se está en una zona con mucha densidad de tráfico, habrá que gastarse más dinero en poner más antenas y más estaciones base con menor distancia entre ellas, y con ello se conseguirá una mayor capacidad, y se podrá atender a la vez a un número mayor de usuarios.

Otro factor importante que determinará el rango de cada sector serán las condiciones de las carreteras, por ejemplo, que esté en cuesta, que sea una curva muy pronunciada, etc.

➤ Para usuarios de datos:

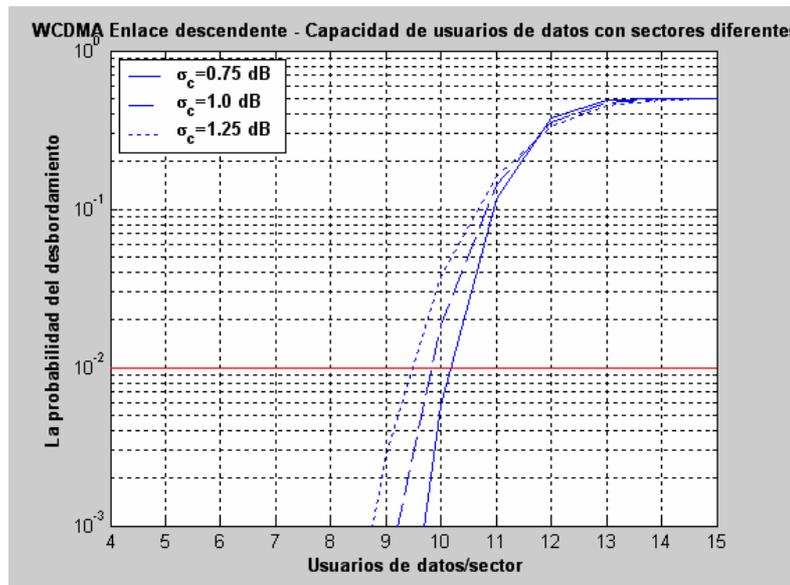


Figura 3-11: Capacidad de usuarios de datos con rango de los sectores diferentes

En este caso, se mantienen el número de usuarios de voz por sector para una probabilidad de desbordamiento del 1%. La gráfica es prácticamente igual que para un rango del sector fijo en 1000 metros.

Esto es debido a que los diferentes rangos de los sectores son al azar, y se complementan sectores de 1200 metros con los de 800 metros.

Si por ejemplo, aumentáramos todos los rangos entre 1200 y 1600 metros, y alguno de ellos fuera de 2000 metros (que es cuando realmente afecta el rango del sector, como ya se verá en el apartado 2.2.3.3, en la figura de la variación con $R(m)$), si se apreciaría un cambio como se ve a continuación en la Figura 3.12.

Para unos valores de los diferentes rangos de los sectores de:

- $R_1=2000m$
- $R_2=1600m$
- $R_3=1400m$
- $R_4=2000m$
- $R_5=1200m$
- $R_6=1300m$
- $R_7=2000m$
- $R_8=1400m$
- $R_9=1300m$
- $R_{10}=2000m$

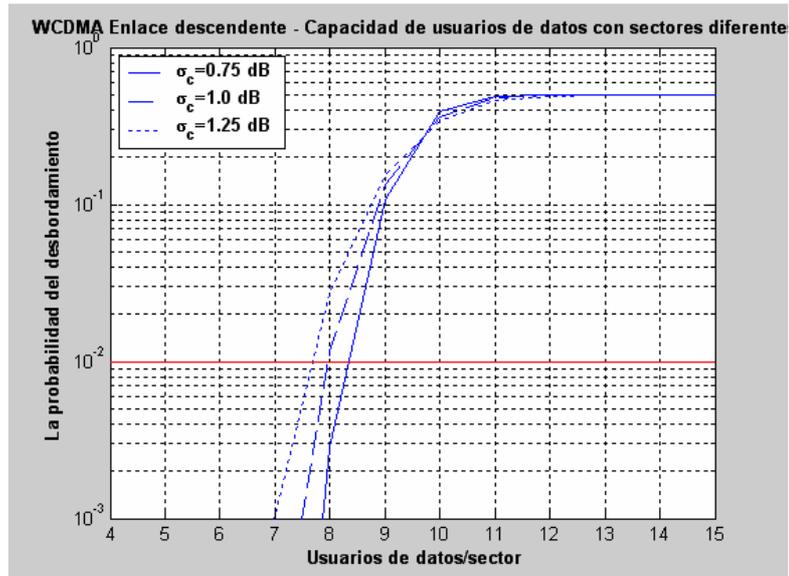


Figura 3-12: Capacidad de usuarios de datos con rango de los sectores grande

Como se puede ver, en este caso si se aprecia una diferencia, bajando la capacidad en aproximadamente 2 usuarios de datos por sector. Un rango de 2000 metros, ya empieza a ser crítico para la capacidad como se verá más adelante en la gráfica que nos dice la capacidad en función del rango “R” del sector.

➤ Para usuarios de voz & datos:

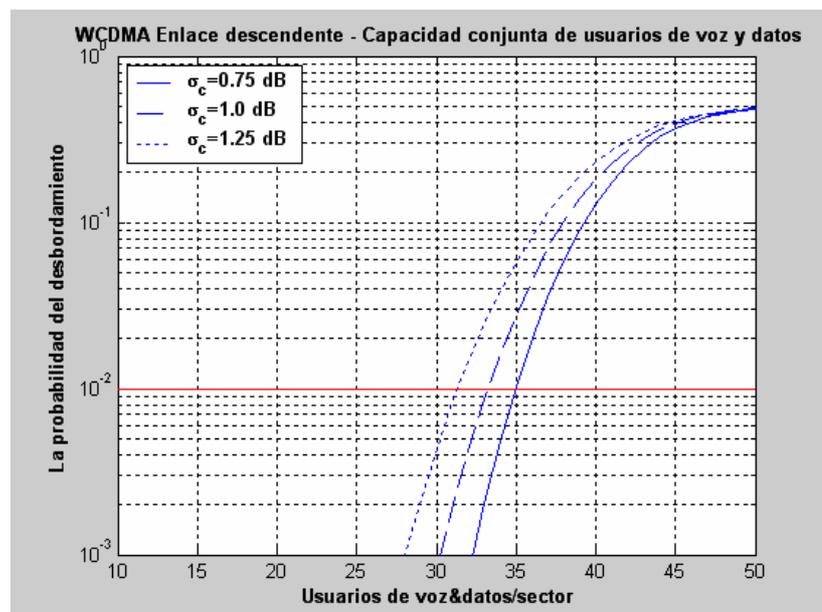


Figura 3-13: Capacidad de usuarios de voz + datos con rango de los sectores diferentes

En este caso, tampoco se nota una gran diferencia con el caso de R constante a 1000 metros. Se notaría una mayor diferencia en la capacidad para R's de 2000 metros, como se ha visto en los casos anteriores, y como se puede ver en la Figura 3.14 con los mismos valores de los rangos de cada sector que para el caso de los usuarios de voz.

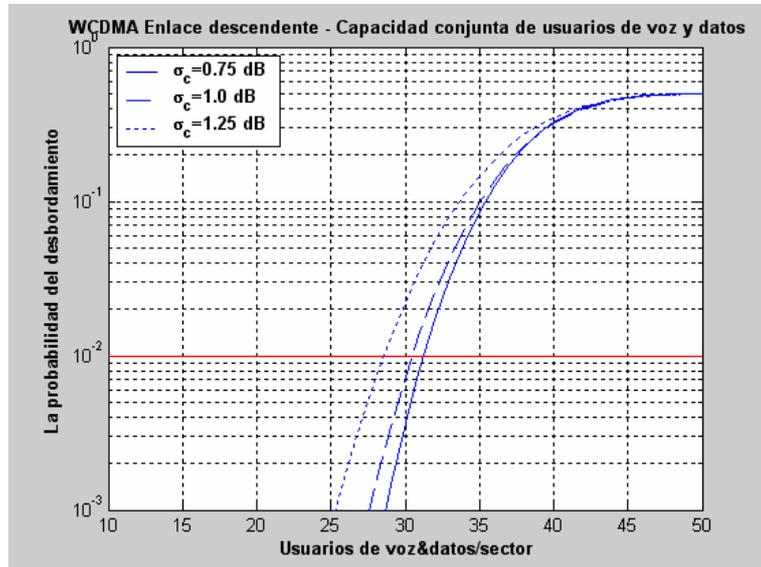


Figura 3-14: Capacidad de usuarios de voz + datos con rango de los sectores grande

Ahora se va a ver como influyen la variación de diferentes parámetros determinantes en el cálculo de la capacidad (número de usuarios por sector).

Para todas las gráficas, se utilizará una resolución de 0.5 para usuarios de voz y de 0.1 para usuarios de datos.

Se harán todos las gráficas mediante cálculos teóricos, por lo que alguno de ellos nos pueden dar valores no reales, como tener una capacidad de 8.5 usuarios, pero a la hora de realizarlo teóricamente si es correcto. En la práctica habría que redondear estos resultados.

3.3.3.3 Influencia de los parámetros en la capacidad

En este apartado, se va a ir variando el valor de los diferentes parámetros, y se van a ver como afecta esta variación en la capacidad.

- **Capacidad del sector en función del valor de R(m)**

En este apartado, se va a ir variando el rango del sector “R”, desde 300 metros hasta 2400 metros, y se va a observar la capacidad del sector para los diferentes valores de R. En este caso, todos los sectores tendrán el mismo valor R.

➤ **Para usuarios de voz:**

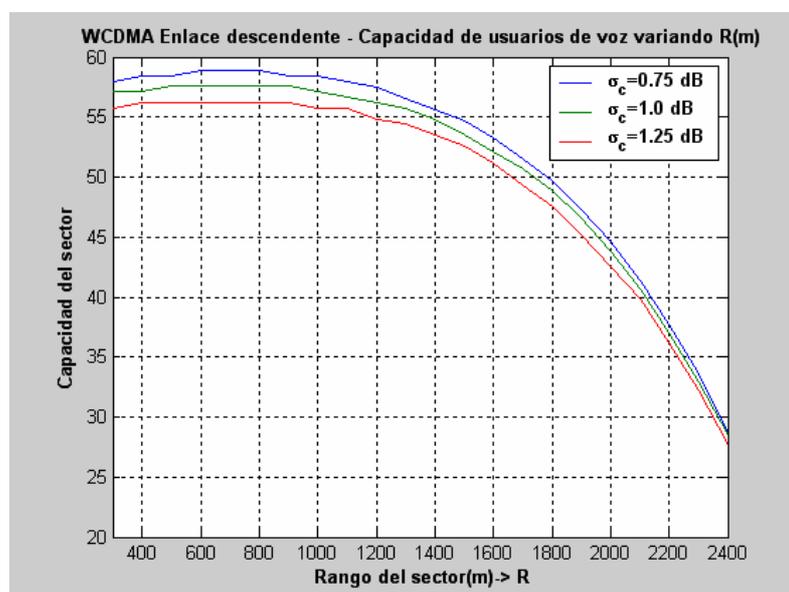


Figura 3-15: Capacidad de usuarios de voz para diferentes valores de R(m)

En la Figura 3.15, se pueden observar 3 gráficas en una, siendo cada una de ellas la capacidad para diferentes valores del error de control de potencia, definido por el parámetro σ_c .

En el radio hasta unos 1200m, la diferencia que existe en la capacidad para cada uno de los valores de σ_c es de 1 usuario aproximadamente.

Por ejemplo, para un radio de 400m, la capacidad para un σ_c de 0.75dB es de 58 usuarios, para un σ_c de 1dB es de 57 usuarios, y para un σ_c de 1.25dB es de 56 usuarios. El valor más alto de capacidad se tiene alrededor de unos 700m, teniendo para un valor de σ_c de 0.75dB, 59 usuarios de voz posibles.

A partir de 1200 metros cae la capacidad considerablemente, hasta que para 2400 metros se sitúa en 27/28 usuarios de voz dependiendo del valor de σ_c .

➤ **Para usuarios de datos:**

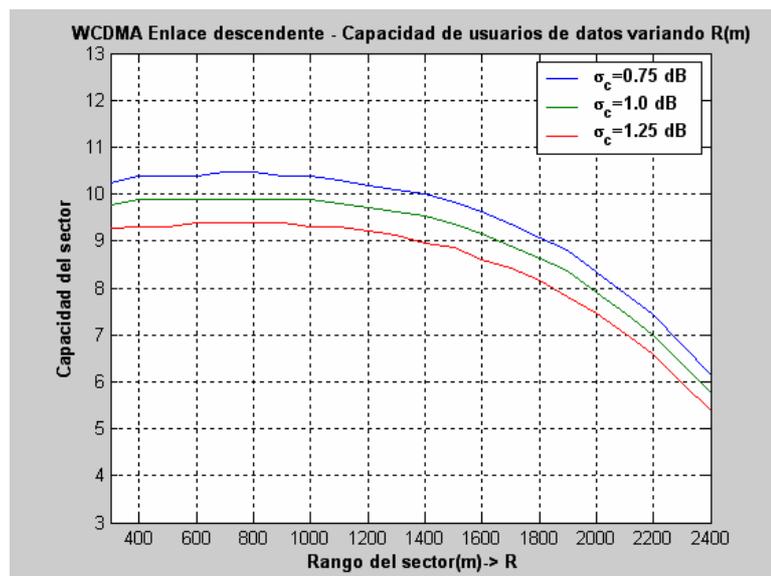


Figura 3-16: Capacidad de usuarios de datos para diferentes valores de R(m)

Como se puede ver en la Figura 3.16, cada línea muestra la capacidad para diferentes valores del control de potencia, definido por el parámetro σ_c .

Para un valor de σ_c de 0.75 dB, si nos fijamos por ejemplo en una distancia de 400 metros se sitúa en una capacidad de más de 10 usuarios de datos, cayendo hasta tener para 2400 metros tener 6 usuarios de datos. Para el caso que se tenía anteriormente donde el rango del sector eran 1000 metros, se ve que para el mismo σ_c , la capacidad es de entre un poco más de 9 y 10 usuarios.

Si se observa otro valor de σ_c como puede ser 1 dB, se puede ver que para 400 metros se sitúa en una capacidad de 10 usuarios de datos, cayendo hasta para 2400 metros tener casi 6 usuarios de datos. Para el caso que se tenía anteriormente donde el rango del sector eran 1000 metros, se ve que para el mismo σ_c , la capacidad es de 10 usuarios de datos.

➤ **Para usuarios de voz & datos:**

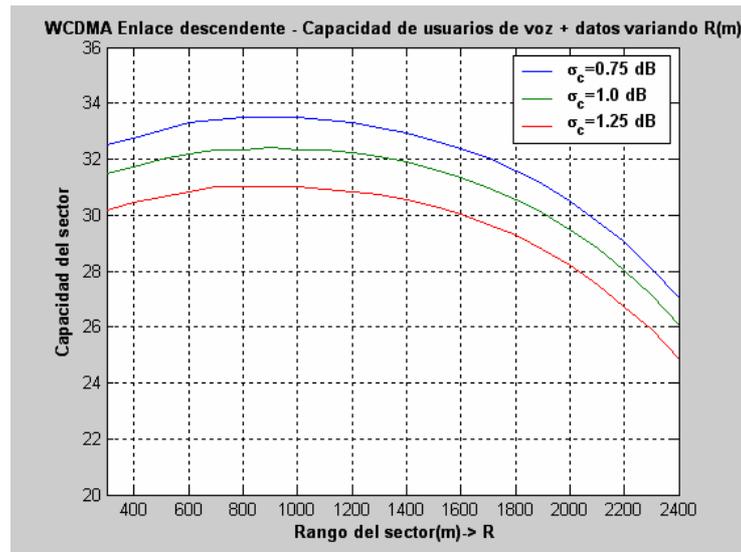


Figura 3-17: Capacidad de usuarios de voz + datos para diferentes valores de R(m)

Para el caso de voz & datos conjunto, se puede ver que entre 600 y 1200 metros, la capacidad se mantiene en aproximadamente 33 usuarios de voz (para un σ_c de 0.75 dB); a partir de los 1200 metros la capacidad va cayendo, llegando en 2400 metros a una capacidad de 27 usuarios de voz y 5 usuarios de datos que fijamos anteriormente, para un σ_c de 0.75 dB.

Para los demás valores de σ_c , la capacidad es un poco menor en todo el rango de R (1 usuario menos aproximadamente para un σ_c de 1dB), y sufre más o menos las mismas variaciones que para el caso estudiado anteriormente.

- **Capacidad del sector en función del valor de $R_b(m)$**

En este apartado, se va a ir variando el valor del punto de ruptura “ R_b ”, desde 200 metros hasta 600 metros, y se va a observar como afecta esta variación en la capacidad del sector. Esta variación del punto de ruptura, se consigue variando la altura de la antena de la estación base (fórmula 3.2).

➤ **Para usuarios de voz:**

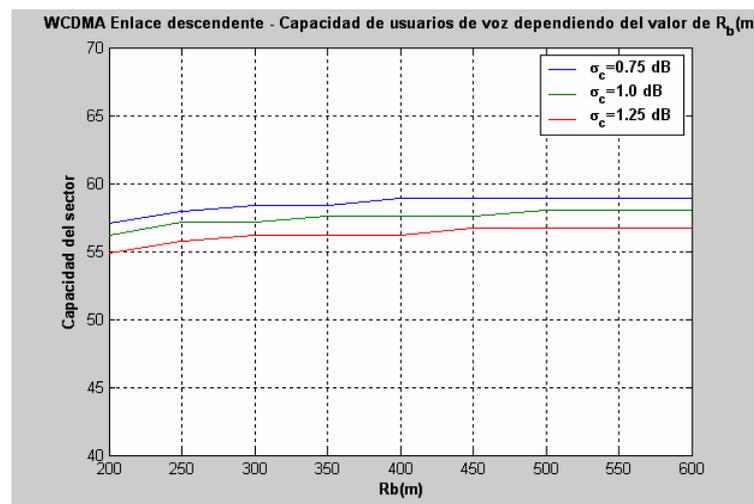


Figura 3-18: Capacidad de usuarios de voz para diferentes valores de $R_b(m)$

Como se puede observar, y sabiendo que el rango del sector es de 1000 metros, a partir de un valor del punto de corte de 350 metros hasta los 600 metros que se hace el análisis, la capacidad del sector se mantiene constante en casi 59 usuarios para σ_c de 0.75dB, y por ejemplo, para σ_c de 1 dB la capacidad sería de 58 usuarios de voz.

Para por ejemplo, σ_c de 0.75 dB, se ve que para un R_b entre 250 y 300 metros, crece linealmente de 57 usuarios a 59 usuarios de voz. Para los demás valores de σ_c también se observan aproximadamente las mismas variaciones en la gráfica.

Al igual que pasa en todas las gráficas en las que existen varias curvas dependiendo del control de potencia determinado por el parámetro σ_c , cuanto menor sea el parámetro que determina el error de control de potencia, mayor será la capacidad.

➤ Para usuarios de datos:

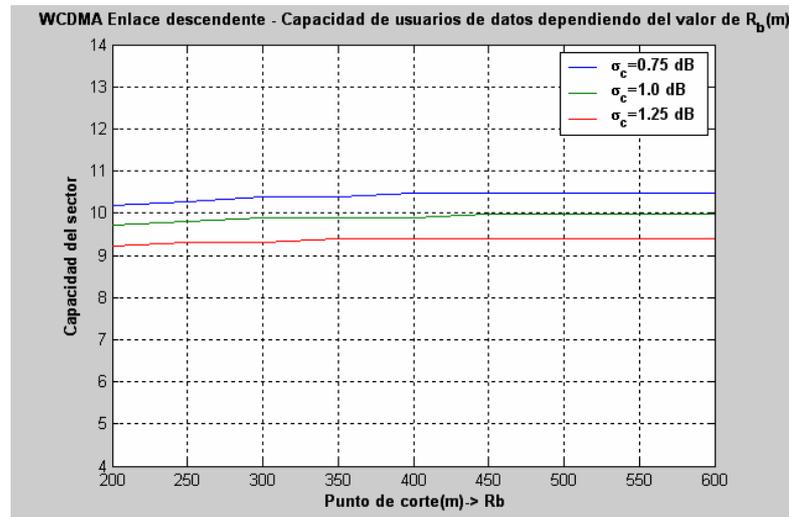


Figura 3-19: Capacidad de usuarios de datos para diferentes valores de R_b (m)

Como se puede ver en la Figura 3.19, para usuarios de datos, se puede ver que la capacidad dada en número de usuarios de datos casi no varía en todo el rango del Punto de corte estudiado.

Para los 3 valores de σ_c estudiados, se puede ver como para un σ_c de 0.75dB, la capacidad se mantiene más o menos constante entre 10 y 11 usuarios, mientras que para un σ_c de 1dB se tienen casi constantemente 10 usuarios de datos. Para el valor de σ_c de 1.25dB, se puede ver como la capacidad se sitúa un poco por encima de 9 usuarios de datos.

➤ Para usuarios de voz & datos:

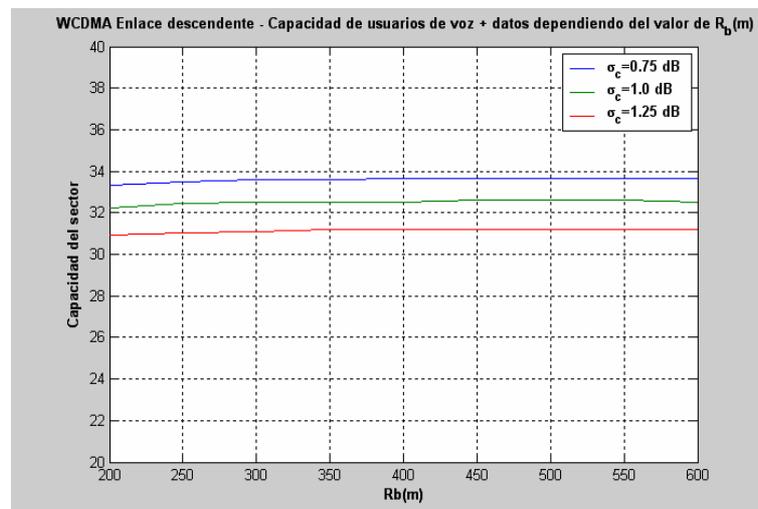


Figura 3-20: Capacidad de usuarios de voz + datos para diferentes valores de R_b (m)

Para el caso de usuarios de datos y voz conjuntos, se puede observar que para los diferentes valores del control de potencia, la capacidad se mantiene prácticamente constante para todo el rango de $R_b(m)$.

Por ejemplo, para σ_c de 0.75 dB, la capacidad es de casi 34 usuarios de voz (más los 5 de datos), menos en un tramo inicial para R_b menor a 300 metros, donde la capacidad es un poco menor, llegando a para un R_b de 200m a 33 usuarios de voz.

Para σ_c de 1 dB, la capacidad se mantiene constante en un valor de entre 32 y 33 usuarios de voz, menos en un tramo inicial para R_b 200 metros, donde la capacidad es 32 usuarios de voz. En todos los casos, hay que sumarle los 5 usuarios de datos fijos que se tiene al hacer los cálculos.

Por último, para σ_c de 1.25 dB, la capacidad es de 21 usuarios de voz y 5 de datos, reduciéndose un poco en el tramo de 200 a 300 metros.

- **Capacidad del sector en función del valor de “ s_1 ”**

En este apartado, se va a ir variando el valor de “ s_1 ”, desde 2 a 2.25, y se va a observar como afecta esta variación en la capacidad del sector.

- **Para usuarios de voz:**

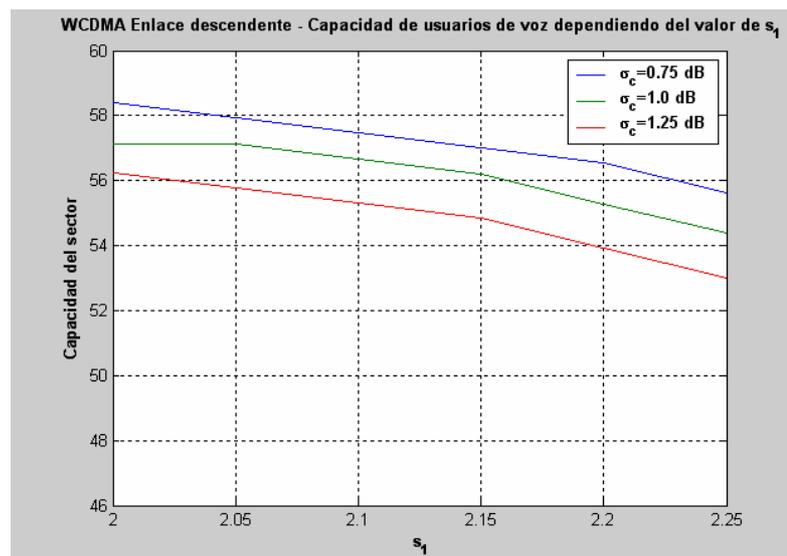


Figura 3-21: Capacidad de usuarios de voz para diferentes valores de s_1

En este caso, la capacidad (número de usuarios de voz en este caso), varía bastante dependiendo del valor del control de potencia.

Por ejemplo, para un valor de σ_c de 1.25 dB, la capacidad es de 56 usuarios de voz para un valor de s_1 de 2. A partir de ahí se va reduciendo poco a poco, llegando para un valor de s_1 de 2.5 a valer un poco más de 53 usuarios de voz.

Para otro valor de σ_c como puede ser 0.75 dB, la capacidad es de un poco más de 58 usuarios de voz par aun valor de s_1 de 2. A partir de ahí se va reduciendo poco a poco, llegando par aun valor de s_1 de 2.5 a valer un poco menos de 56 usuarios de voz.

El mayor valor de capacidad se consigue para un valor de σ_c de 0.75 dB y s_1 con un valor de 2, conseguimos tener 58 usuarios de voz.

➤ **Para usuarios de datos:**

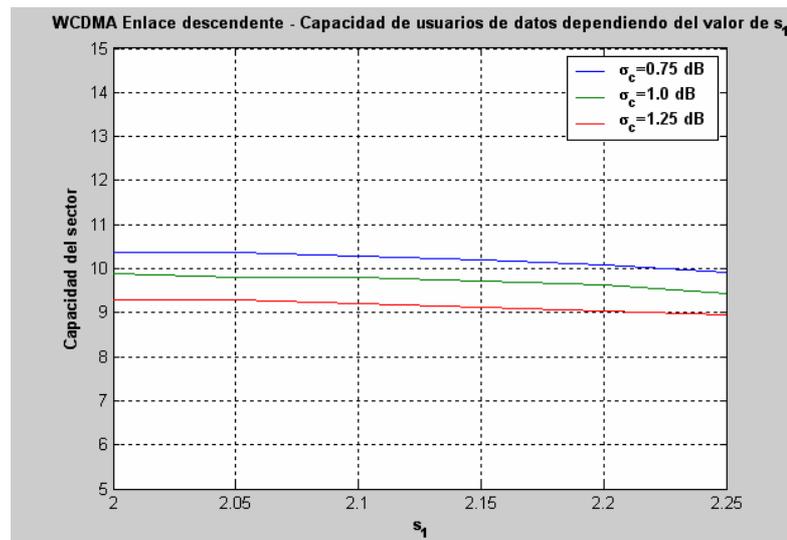


Figura 3-22: Capacidad de usuarios de datos para diferentes valores de s_1

Se puede ver, que la capacidad se mantiene más o menos constante entre un poco más de 9 usuarios de datos y un poco menos de 11 usuarios de datos, dependiendo del valor de σ_c y decreciendo muy poco a medida que aumenta el parámetro s_1 .

➤ Para usuarios de voz & datos:

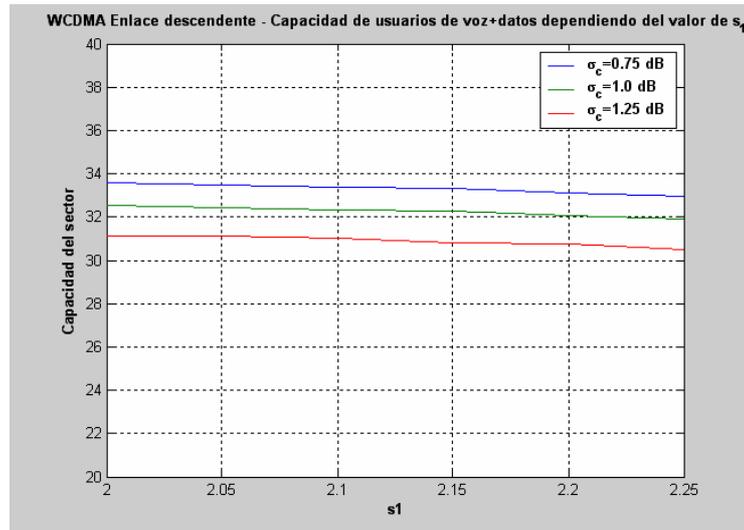


Figura 3-23: Capacidad de usuarios de voz + 5 de datos para diferentes valores de s_1

Como se puede observar en la gráfica, para usuarios de datos y voz conjunto, la capacidad varía entre 31 y casi 34 usuarios de voz y 5 de datos dependiendo del valor de σ_c . Al igual que en los casos anteriores, esta capacidad decrece un poco a medida que aumenta el parámetro s_1 .

Por ejemplo, para σ_c de 1.25 dB, se tiene que la capacidad es constante en 31 usuarios de voz y 5 de datos para valores de s_1 entre 2 y 2.2, descendiendo a casi 30 usuarios de voz y 5 de datos para un valor de s_1 de 2.25.

Para los demás valores del error de control de potencia pasa algo parecido, ya que en el tramo inicial se mantienen más o menos constantes para un valor de capacidad, reduciéndose en 1 usuario para un valor de s_1 de 2.25.

- **Capacidad del sector en función del valor de “ s_2 ”**

En este apartado, se va a ir variando el valor de “ s_2 ”, desde 4 a 6, y se va a observar como afecta esta variación en la capacidad del sector.

➤ **Para usuarios de voz:**

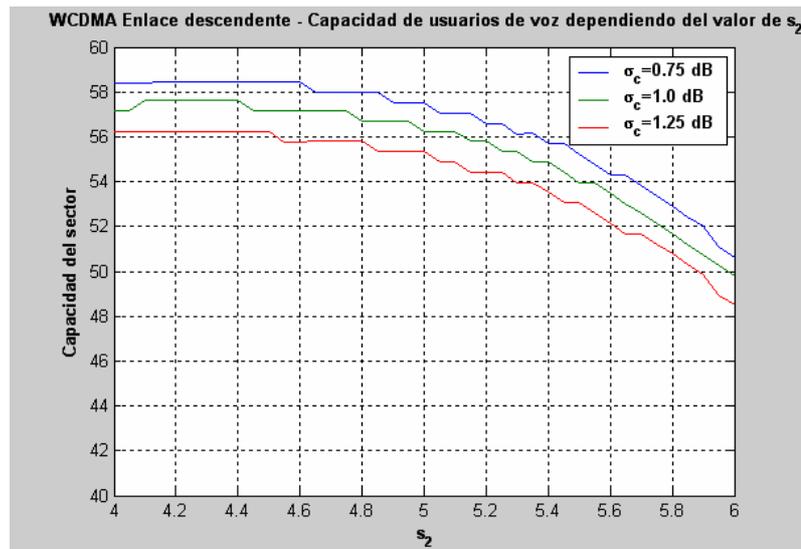


Figura 3-24: Capacidad de usuarios de voz para diferentes valores de s_2

Como se puede ver en la Figura 3.24, se representa para distintos valores de s_2 , entre 4 y 6, cuantos usuarios por sector se pueden comunicar, dependiendo del valor de σ_c .

Para σ_c con un valor de 0.75 dB, se tendrá que la capacidad se mantiene constante en un poco más de 58 usuarios entre valores de s_2 de 4 a 4.9; a partir de ese valor, la capacidad va disminuyendo gradualmente, hasta llegar, para un valor de s_2 de 6 a casi 51 usuarios.

De la misma manera para un control de potencia de 1 dB, la capacidad se mantiene constante entre valores de s_2 de 4 a 5 en 58 usuarios de voz (con un pequeño pico de medio usuario), disminuyendo progresivamente hasta llegar a 50 usuarios para un valor de s_2 de 6.

Para σ_c de 1.25 dB, la capacidad se mantiene en 56 usuarios en el mismo rango que para el anterior valor, reduciéndose gradualmente hasta llegar para un valor del parámetro s_2 de 6 a 49 usuarios.

➤ Para usuarios de datos:

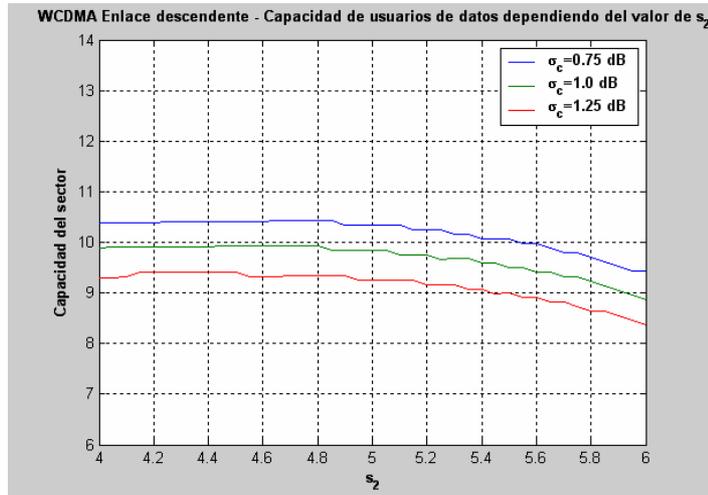


Figura 3-25: Capacidad de usuarios de datos para diferentes valores de s_2

Para σ_c igual a 0.75 dB, se tiene que la capacidad se mantiene constante en un valor de más de 10 usuarios de datos, para valores de s_2 entre 4 y 5, produciéndose una bajada de 1 usuario de datos para un valor de s_2 de 6.

Para los otros dos valores de σ_c pasa aproximadamente lo mismo, pero por ejemplo para σ_c con un valor de 1.25 dB, para valores de s_2 entre 4 y 5 se mantiene entre 9 y 10 usuarios de datos, descendiendo para s_2 igual a 6 a un poco más de 8 usuarios de datos.

➤ Para usuarios de voz & datos:

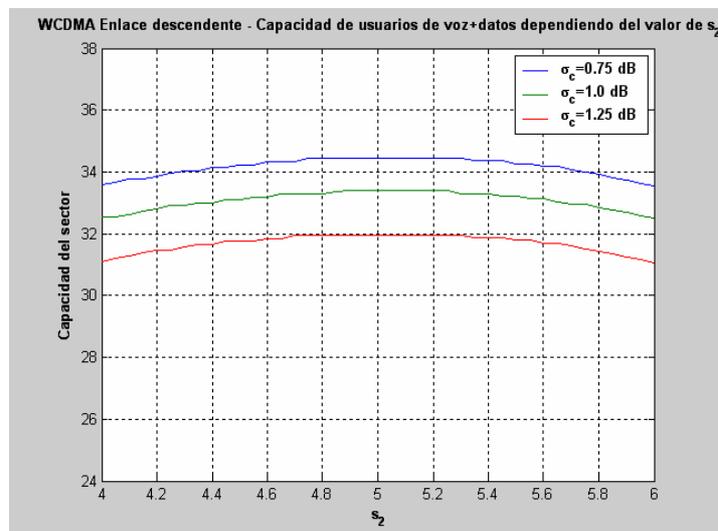


Figura 3-26: Capacidad de usuarios de voz + 5 usuarios de datos para diferentes valores de s_2

Para usuarios de voz y datos, la capacidad es mayor en un rango intermedio de valores de s_2 decreciendo en ambos extremos.

Por ejemplo, para un valor del error de control de potencia de 0.75 dB, se tiene que para un rango de s_2 entre 4.8 y 5.4 la capacidad se mantiene constante e un poco más de 34 usuarios de voz (más los 5 de datos), mientras que para un s_2 de 4, la capacidad decrece hasta casi 33 usuarios de voz al igual que le pasa en el otro extremo, para s_2 de 6, la capacidad es de 33 usuarios de voz y 5 de datos.

Lo mismo pasa para los demás valores del control de potencia, pero reduciéndose un poco la capacidad respecto a σ_c igual a 0.75 dB. Para un s_2 de 1 dB, la capacidad se reduce en aproximadamente 1 usuario respecto a un valor de s_2 de 0.75dB, al igual que pasa con el valor de s_2 de 1.25dB, que se reduce 1 usuario respecto un valor de s_2 de 1dB.

• Capacidad del sector en función del valor de “SII”

En este apartado, se va a ir variando el valor del nivel de lóbulos secundarios “SII”, desde -24dB a -10dB, y se va a observar como afecta esta variación en la capacidad del sector.

➤ Para usuarios de voz:

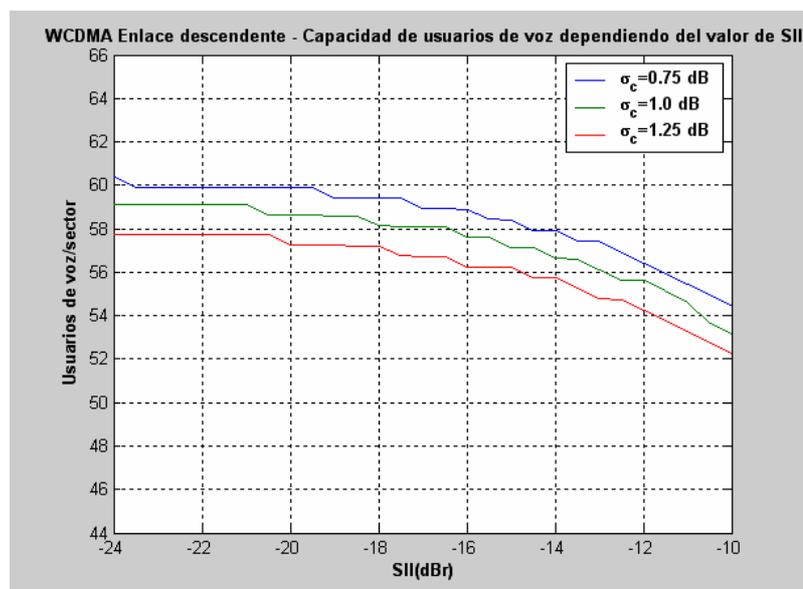


Figura 3-27: Capacidad de usuarios de voz para diferentes valores de SII

Como se puede ver, al aumentar el nivel de los lóbulos (parámetro SII), disminuye la capacidad del sector (usuarios voz por sector).

Para un σ_c de 0.75 dB y un nivel de lóbulos secundarios SII de entre -24 y -19, la capacidad se mantiene aproximadamente en 60 usuarios, y después decrece gradualmente hasta llegar a un poco más de 54 usuarios de voz para un SII de -10 dB.

Para un σ_c de 1 dB, la capacidad o número de usuarios de voz se mantiene constante para valores de SII de entre -24 y -21 dB, siendo la capacidad aproximadamente 59 usuarios, y llegando para un SII de -10 dB hasta una capacidad de 53 usuarios de voz por sector.

Para un σ_c de 1.25 dB, se tiene que la capacidad para valores de SII de entre -24 y -20 dB se mantiene constante en casi 58 usuarios de voz por sector, reduciéndose hasta 52 usuarios de voz por sector para un valor de SII de -10 dB.

➤ **Para usuarios de datos:**

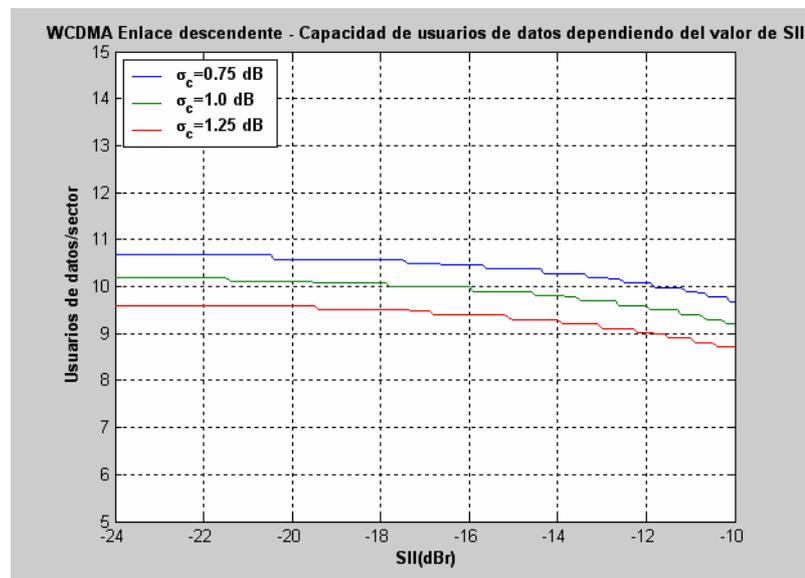


Figura 3-28: Capacidad de usuarios de datos para diferentes valores de SII

Al igual que para el caso de usuarios de datos, aunque de una forma menos pronunciada, al aumentar el nivel de los lóbulos (parámetro SII), disminuye la capacidad del sector (usuarios datos por sector).

Para un σ_c de 0.75 dB y un nivel de lóbulos secundarios SII de entre -24 y -16 dBr, la capacidad se mantiene aproximadamente en un poco menos de 11 usuarios de datos, y después decrece hasta 10 usuarios de datos para un SII de entre -12 y -10 dBr.

Para un σ_c de 1 dB, la capacidad o número de usuarios de datos se mantiene constante para valores de SII de entre -24 y -14 dBr, siendo la capacidad de aproximadamente 10 usuarios de datos, y llegando para un SII de -10 dBr a 9 usuarios de datos por sector.

Para un σ_c de 1.25 dB, se tiene que la capacidad para valores de SII de entre -24 y -14 dBr se mantiene constante entre 9 y 10 usuarios de datos por sector, reduciéndose a un poco menos de 9 usuarios de datos por sector para un valor de SII entre -14 y -10 dBr.

Con todo ello se puede ver, que en todo el rango representado de SII de entre -24 y -10 dBr, la capacidad varía muy poco, ya que como mucho varía en un usuario entre ambos extremos del nivel de lóbulos secundarios.

➤ **Para usuarios de voz & datos:**

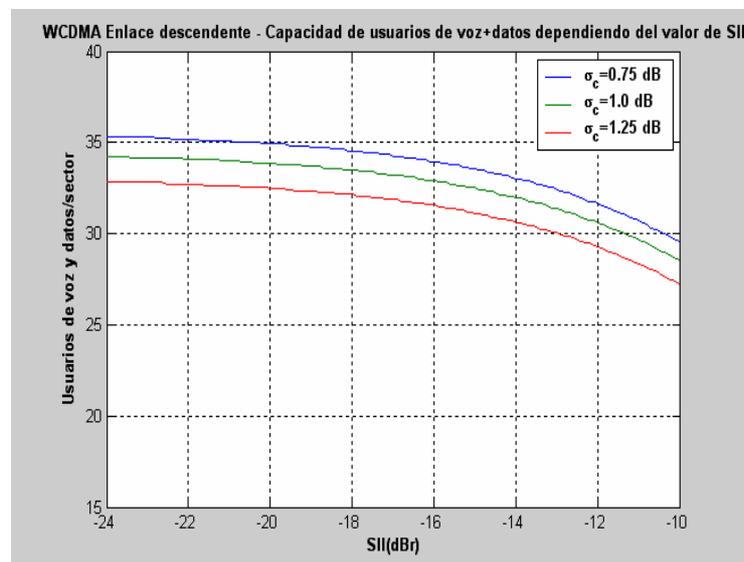


Figura 3-29: Capacidad de usuarios de voz + 5 usuarios de datos para diferentes valores de SII

En este caso también al aumentar el nivel de los lóbulos (parámetro SII), disminuye la capacidad del sector (usuarios voz por sector), y en este caso respecto al de únicamente usuarios de datos, decrece de una forma mucho más pronunciada.

Para un σ_c de 0.75 dB y un nivel de lóbulos secundarios SII de entre -24 y -18, la capacidad se mantiene aproximadamente en 35 usuarios de voz y 5 usuarios de datos, y después decrece gradualmente la capacidad hasta que para un valor de SII de -10 dB el número de usuarios es 30.

Para un σ_c de 1 dB, la capacidad o número de usuarios de voz se mantiene constante para valores de SII de entre -24 y -19 dB, siendo la capacidad 34 usuarios de voz y 5 usuarios de datos, y llegando para un SII de -10 dB a 29 usuarios de voz y 5 de datos por sector.

Para un σ_c de 1.25 dB, se tiene que la capacidad para valores de SII de entre -24 y -20 dB se mantiene constante en 33 usuarios de voz y 5 de datos por sector, reduciéndose a un poco más de 27 usuarios de voz y 5 de datos por sector para un valor de SII de -10 dB.

Como se puede ver, para los 3 casos la capacidad disminuye en 5 usuarios por sector para un SII de -10 dB.

- **Capacidad del sector en función del valor del “Factor de correlación de shadowing”**

En este apartado, se va a ir variando el factor de correlación de shadowing, desde 0.3 a 0.7, y se va a observar como afecta esta variación en la capacidad del sector.

➤ **Para usuarios de voz:**

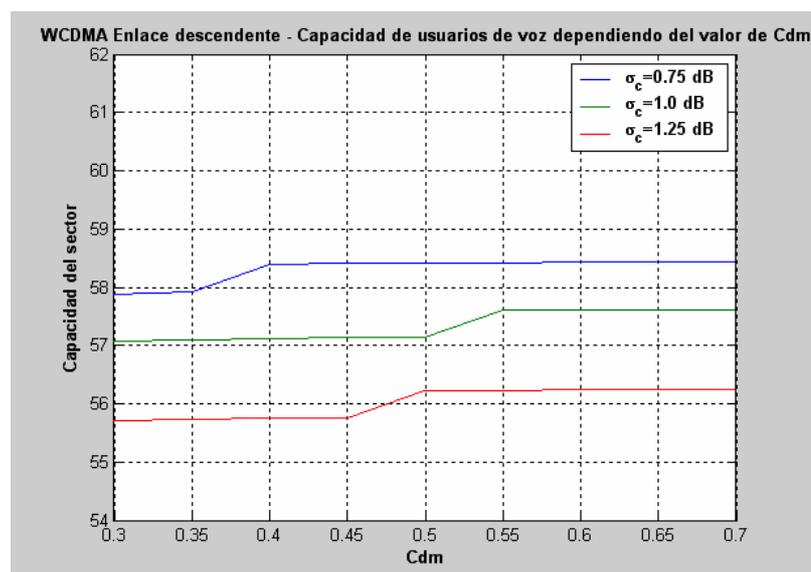


Figura 3-30: Capacidad de usuarios de voz para diferentes valores de C_{dm}

La capacidad aumenta a medida que se aumenta la correlación de shadowing. Si se tiene una correlación de 0.5 para un control de potencia de 0.75 dB, la capacidad se sitúa, como ya vimos en el caso general en un poco más de 58 usuarios de voz.

Se puede ver que la variación que produce el aumento de la correlación entre 0.3 y 0.7, no supone una gran variación en la capacidad, ya que no llega ni a aumentar 1 usuario de voz en todo el rango de correlación.

Prácticamente ocurre lo mismo para los demás valores del error de control de potencia, donde por ejemplo, para un valor de σ_c de 1 dB, se tiene que para una correlación de 0.3, la capacidad es casi 57 usuarios de voz, mientras que para un valor de correlación de 0.7, no se llega a 58 usuarios, lo que significa un aumento de 1 usuario por aumentar la correlación en 0.4.

Con todo ello, se puede ver como la variación del nivel de correlación de shadowing no produce un cambio grande en la capacidad.

➤ **Para usuarios de datos:**

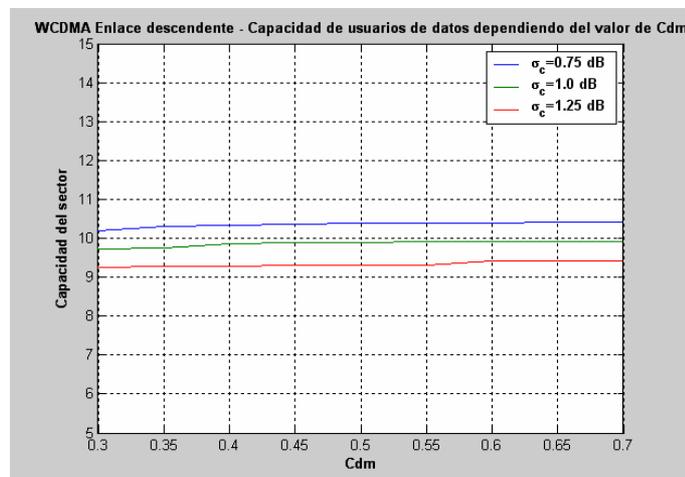


Figura 3-31: Capacidad de usuarios de datos para diferentes valores de C_{dm}

Como se puede ver en la Figura 3.31, al igual que pasa en el caso de usuarios de voz, para usuarios de datos, la correlación entre 0.3 y 0.7 varía la capacidad en aproximadamente un usuario de datos. Por ejemplo, para de σ_c de 0.75 dB, la capacidad se mantiene prácticamente constante en un poco más de 10 usuarios. Para los casos de σ_c de 1 y 1.25 dB, también se mantiene constante en un 10 y un poco más de 9 usuarios de datos respectivamente.

➤ Para usuarios de voz & datos:

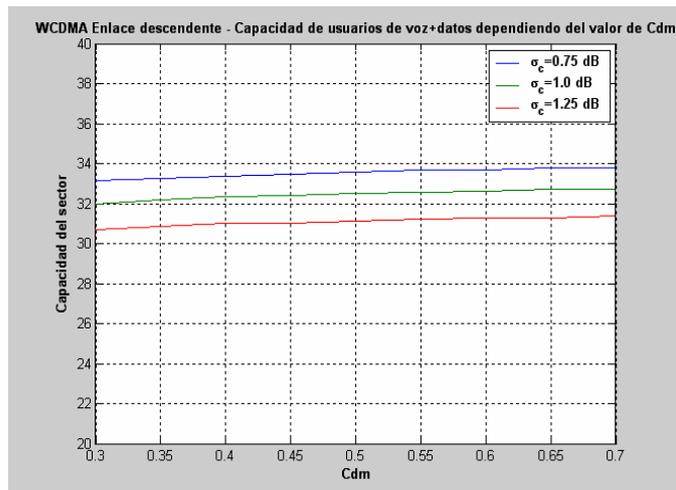


Figura 3-32: Capacidad de usuarios de voz y 5 usuarios de datos para diferentes valores de C_{dm}

En el caso de voz y datos conjunto, el aumento de la correlación de 0.3 a 0.7, aumenta la capacidad en menos de 1 usuario. Por ejemplo, para el caso de σ_c de 0.75dB, para una correlación de 0.3 la capacidad es de 33 usuarios de voz más los 5 usuarios de datos y para una correlación de 0.7, casi se llega a 34 usuarios de voz más los 5 de datos.

• Capacidad Mixta

En este apartado, se va a ir variando el número de usuarios de datos del sector, desde 0 a 10, y se va a observar como afecta esta variación en la capacidad del sector del número de usuarios de VOZ.

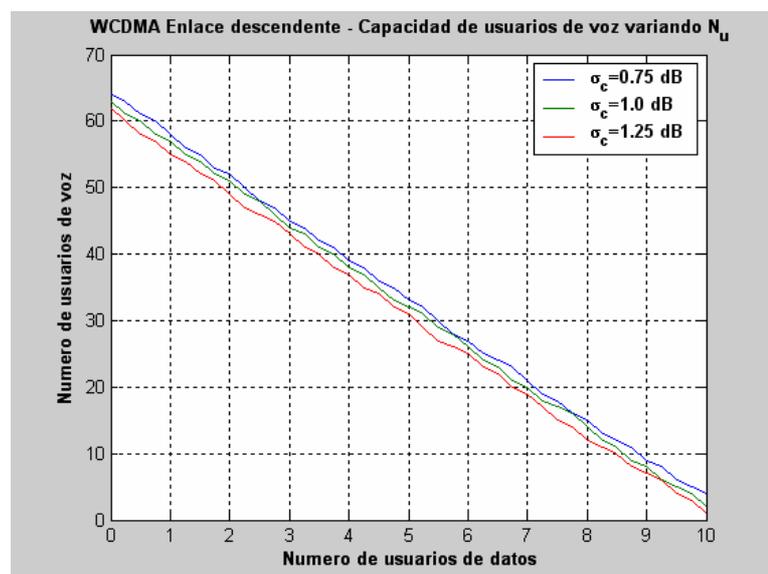


Figura 3-33: Capacidad de usuarios de voz variando el número de usuarios de datos

Como se puede ver en la gráfica, si no existen usuarios de datos, la capacidad del sector sólo para usuarios de voz es la máxima, llegando aproximadamente a 64 usuarios de voz por sector, para un error de control de potencia de 0.75 dB.

En cambio, si se va aumentando el número de usuarios de datos, se puede ver que para 10 usuarios de datos, la capacidad es 4 usuarios de datos.

Se puede ver, que como ya salió anteriormente, para un número de usuarios de datos de 5 usuarios, la capacidad es aproximadamente 33 usuarios de voz, dato que ya se dedujo en un apartado anterior.

3.4 La capacidad del enlace descendente

A continuación, se va a analizar con detalle el enlace descendente de los sistemas WCDMA.

3.4.1 Introducción al enlace descendente de WCDMA

Como ya se ha visto en la introducción de WCDMA, el límite de la capacidad en el enlace descendente se alcanza cuando la potencia total solicitada al transmisor para que los móviles afiliados al transmisor puedan funcionar con la SIR nominal, iguala a la máxima potencia disponible.

Como ya se dijo también, el enlace descendente tiene unas características operativas diferentes que en enlace ascendente. Esto es debido a que:

- La comunicación procede de un único transmisor (base) con destino a múltiples receptores (móviles).
- Debe radiarse con cierto nivel una señal de referencia común (piloto) para la adquisición de los sistemas móviles y facilitar la detección coherente y la estimación del canal por parte de éstos.
- La interferencia externa recibida por un móvil procede de un número limitado de fuentes concentradas (estaciones base de otras células) en vez de provenir de un número grande de estaciones distribuidoras, como sucede en el enlace ascendente.
- La interferencia interna, teóricamente es nula, ya que el enlace descendente utiliza códigos ortogonales. Sin embargo, en la práctica, la ortogonalidad no se mantiene en el enlace descendente debido a la propagación multitrayecto, por lo que hay que tener en cuenta esta interferencia interna.

Básicamente, el recurso que se utiliza en el enlace descendente es la potencia de la estación base que se reparte entre el canal piloto, los canales comunes y los canales de tráfico para los usuarios. El límite de capacidad se alcanza con un número de usuarios tal que la potencia disponible de la estación base, distribuidora entre ellos, es insuficiente para asegurar la cumplimentación del requisito de mínima relación señal/interferencia, o equivalentemente, cuando la exigencia de potencia para mantener este requisito, rebasa la potencia disponible en la estación base.

El cálculo de la capacidad es complicado ya que influye la posición en donde estén los móviles, así como la carga de tráfico de las células vecinas y de la de referencia. El cálculo que veremos a continuación en el apartado 3.4.2, se basa en las siguientes hipótesis:

- Todas las estaciones base transmiten con la misma potencia máxima, con una matización. La potencia media radiada por una estación base depende del número de usuarios de móviles servidos por ella. Por consiguiente, la hipótesis de máxima potencia radiada presupone que la base está funcionando a plena carga. Es un caso desfavorable, pero realista, ya que puede darse en redes desplegadas en zonas con una gran densidad de tráfico.
- La potencia de las estaciones base se divide en dos partes: un porcentaje de la misma se destina a radiar el canal piloto y otros canales comunes. El porcentaje restante se distribuye entre los canales de tráfico.
- Cada usuario está acampado en una célula de tal forma que tiene asignada una fracción de potencia determinada, en función de la calidad de la comunicación.
- Se considera que el usuario recibe interferencia interna con toda la potencia radiada por su base para el mismo y los demás usuarios de la célula, es decir, no se considera la reducción de interferencia interna por ortogonalidad (caso pesimista).
- No se considera el efecto del traspaso de continuidad.

Con todas estas hipótesis, vamos a pasar a realizar un estudio teórico del cálculo de la capacidad en el enlace descendente de WCDMA, el cual utilizaremos para desarrollar una serie de resultados que podremos utilizar para desplegar un sistema real.

3.4.2 Análisis del enlace descendente de WCDMA

Usando el modelo de propagación de dos pendientes expresado en el apartado 2.2, se va a calcular los estadísticos de interferencia [2] (valor medio y varianza) para encontrar la capacidad del enlace descendente de WCDMA.

La Figura 3.34, muestra la configuración de las 8 estaciones WCDMA con celdas en forma de cigarro que se tiene en cuenta en el análisis y la Figura 3.35 muestra a su vez el diagrama de radiación de las dos antenas utilizadas en cada estación WCDMA. Se asume que las estaciones estarán espaciadas regularmente a una distancia $2R$. El rendimiento de las estaciones WCDMA será estudiado considerando el sector derecho de la estación WCDMA C1.

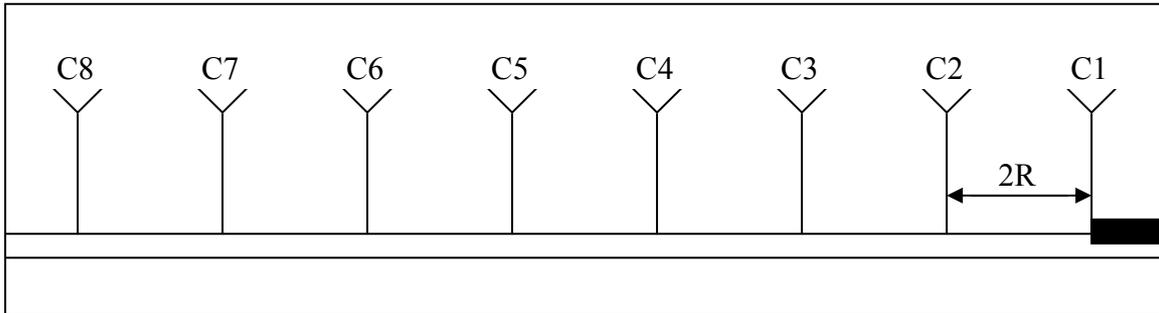


Figura 3-34: Modelo de las estaciones bases en WCDMA de 8 celdas en forma de cigarro

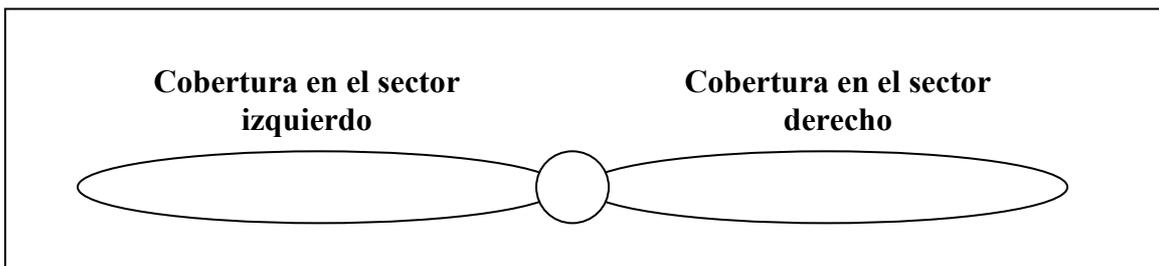


Figura 3-35: Diagrama horizontal de radiación de las dos antenas direccionales usadas en cada estación base.

El usuario i está a una distancia r_{i0} de la estación WCDMA bajo estudio ($C1$) y a una distancia r_{id} de las estaciones WCDMA interferentes, como se ve en la Figura 3.36.

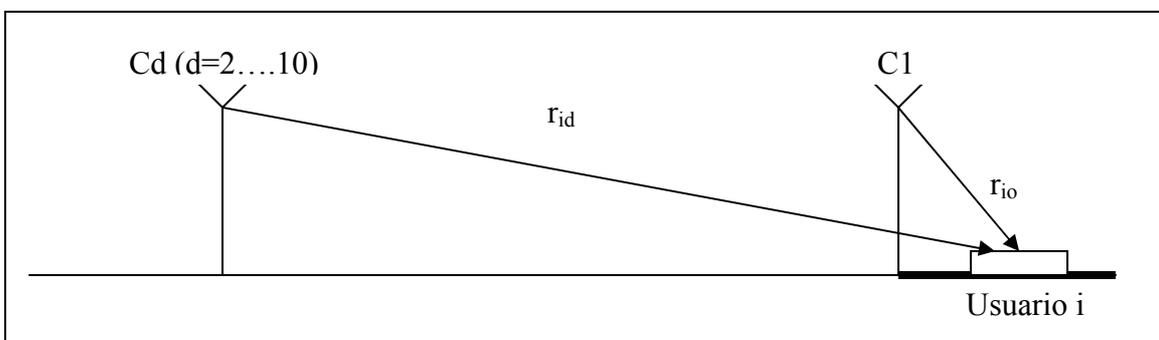


Figura 3-36: Diagrama esquemático del escenario de GSM con un usuario móvil en celdas de autopistas

Con todo ello, la señal de interferencia $L(r_{id}, r_{io})$ debido únicamente a la distancia viene dada por las siguientes fórmulas (dependiendo del valor de estas distancias respecto a R_b):

- Si r_{id} y $r_{io} \leq R_b$ (caso no práctico):

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (3.41)$$

- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{io} \leq R_b$:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{R_b} \right)^{s_1} \left(\frac{R_b}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (3.42)$$

- Si r_{id} y $r_{io} > R_b$:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (3.43)$$

Estos cálculos tienen solo en cuenta la distancia; si se quiere calcular la interferencia $I(r_{id}, r_{io})$ debido a la distancia y al shadowing, se deberá usar la siguiente fórmula:

$$I(r_{id}, r_{io}) = 10^{(\xi_{id} - \xi_{io})/10} L(r_{id}, r_{io}) \quad (3.44)$$

Siendo,

- Si r_{id} y $r_{io} \leq R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_1$ y $\xi_{io} = \xi_1$
- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{io} \leq R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{io} = \xi_1$
- Si r_{id} y $r_{io} > R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{io} = \xi_2$

La potencia recibida de la señal deseada viene dada por:

$$P_r = k P_{usuario} \quad (3.45)$$

Donde,

- Donde el parámetro k , es el factor de pérdidas y viene definido por la siguiente ecuación:

$$k = 10^{-(L_{or}(dB) - G_{tx}(dB) - G_{rx}(dB))/10} \quad (3.46)$$

- P_{usuario} , es la potencia de usuario que viene dado por:

$$P_{\text{usuario}} = (P_t - P_{\text{piloto}}) / (N_s * \alpha_s) \quad (3.47)$$

Siendo,

- P_t , es la potencia de transmisión de la estación WCDMA bajo estudio
- P_{piloto} , es la potencia utilizada para el piloto, que es el 10% de la P_t
- N_s , que es el número de usuarios por sector para un servicio dado
- α_s , que es el factor de actividad para un servicio dado
- L_{or} , es la pérdida (medida en dB) debida a la distancia “r” que existe entre la estación WCDMA bajo estudio y el usuario.
- G_{tx} , es la ganancia de la antena de la estación base medida en dB
- G_{rx} , es la ganancia de la antena móvil que se asume que es 0 dB.

En L_{or} , se tiene en cuenta tanto el efecto de la distancia como del shadowing. Para una disponibilidad “ α ” dada, L_{or} viene dada por:

$$\begin{cases} L_{or}(dB) = L_b + 10 s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \alpha_1 Q^{-1}(\alpha), & \text{if } r \leq R_b \\ L_{or}(dB) = L_b + 10 s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \alpha_2 Q^{-1}(\alpha), & \text{if } r > R_b \end{cases} \quad (3.48)$$

$$\begin{cases} L_{or}(dB) = L_b + 10 s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \alpha_2 Q^{-1}(\alpha), & \text{if } r > R_b \end{cases} \quad (3.49)$$

Donde $Q^{-1}()$ es la inversa de la función Gaussiana Q, definida por la siguiente ecuación:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad (3.50)$$

La función $Q^{-1}()$ tiene un valor de 2.05 para una disponibilidad del 98%, y 2.34 para un valor de disponibilidad del 99%.

El valor esperado de la potencia interferente debido a las demás estaciones WCDMA (de la 2 a la 8) viene dado por:

$$E[I_{\text{inter}}] = P_r \sum_{d=2}^8 e^{(\beta^2 \sigma^2 / 2)} L(r_{id}, r_{io}) Q \left[\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma} \right] \quad (3.51)$$

Donde,

- β , tiene un valor de $\ln(10)/10$
- σ , es la desviación estándar ($\xi_{id}-\xi_{io}$)
- Q , es la función Gaussiana definida anteriormente

La varianza de la potencia interferente viene dada por,

$$\text{var}[I_{inter}] = P_r^2 \sum_{d=2}^8 e^{2(\beta^2 \sigma^2)} L(r_{id}, r_{io})^2 \left\{ g\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) - f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) \right\} \quad (3.52)$$

Donde,

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[2\beta\sigma + \frac{10\log_{10}\{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (3.53)$$

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[\beta\sigma + \frac{10\log_{10}\{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (3.54)$$

Además, en el caso de WCDMA se debe tener en cuenta la interferencia intracelular, provocada por usuarios que están en la misma celda. Esta potencia de la interferencia intracelular viene dada por la siguiente fórmula **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$I_{int ra} = (P_t - P_{usuario}) \varphi k \quad (3.55)$$

Siendo,

- φ , el factor de ortogonalidad (que se tomará como 0.1)
- Los demás parámetros están definidos en las fórmulas 2.46 y 2.47

Para un valor de disponibilidad “ α ” dado, la relación señal a ruido más las interferencias, definida por el parámetro “SINR” del usuario bajo estudio viene dado por,

$$SINR = \frac{S}{N + I} = \frac{P_r}{E[I_{inter}] + P_N + Q^{-1}(\alpha)\sqrt{\text{var}[I_{inter}] + I_{int ra}}} \quad (3.56)$$

Donde P_N es el ruido térmico del receptor móvil.

3.4.3 Resultados del enlace descendente de WCDMA

Usando las fórmulas definidas en el apartado 3.4.3, se va a pasar a describir los resultados numéricos obtenidos.

Para ello, se ha utilizado un código desarrollado mediante el software matemático “Matlab”, en el que se definen los parámetros según los valores siguientes:

$C_{do} = 0.5$	$G_{p_voz} = 256$
$s_1 = 2$	$G_{p_datos} = 26.66$
$s_2 = 4$	$\alpha_{datos} = 1$
$\sigma_1 = 3 \text{ dB}$	$\alpha_{voz} = 0.63$
$\sigma_2 = 6 \text{ dB}$	$G_{tx} = 10 \text{ dB}$
$R_b = 300 \text{ m}$	$G_{rx} = 0 \text{ dB}$
$R = 1000 \text{ m}$	Frecuencia = 2150 MHz
$\alpha = 0.99$	Ortogonalidad=0.1;
$P_t = 1 \text{ W}$	$P_N = -100 \text{ dBm}$

Tabla 3-2: Valores de los parámetros para el enlace descendente de WCDMA

En un principio, también se fijará el rango del sector “R” a 1000 metros; en un apartado posterior, se irá variando para determinar como influye en las interferencias dicho parámetro.

Como ya vimos en el apartado del enlace ascendente, otro parámetro fijo durante todo el desarrollo es la tasa de SINR deseado, que tiene diferente valor dependiendo de si los usuarios son de datos o de voz. Estos valores del SINR deseado son: 7 dB para voz y de 2.5 dB para datos [4].

Lo primero que se va a analizar es la capacidad (número de usuarios por sector), poniendo como requisito que se cumpla en SINR deseado para cada caso, voz y datos y teniendo en cuenta los cálculos teóricos mostrados en el apartado 3.4.3.

A continuación, se muestra una tabla con el número de usuarios de voz y datos medio a los que se puede dar cobertura con un SNIR mayor que el SNIR deseado, que en el caso de los usuarios de voz es de 7 dB, y en el caso de los usuarios de datos de 3dB.

	Voz	Datos
Número de usuarios	400.47	73.95

Tabla 3-3: Capacidad del sector

Como ya se ha visto en el apartado 3.3, cuando analizamos el enlace ascendente de WCDMA, el número de usuarios a los que se les podía dar servicio en el caso de usuarios de voz si el rango del sector era de 1000 metros estaba entre 52 y 59 usuarios dependiendo del valor del parámetro σ_c . Esto se puede ver en la Figura 3.5, del apartado 3.3.3.1.

Debido a que la capacidad del enlace descendente es mucho mayor, la capacidad que restringe el número de usuarios a los que se puede dar servicio en el rango del sector es la del enlace ascendente, siendo la capacidad de WCDMA de entre 52 y 59 usuarios dependiendo del valor de σ_c , y con los valores de los diferentes parámetros fijados en la Tabla 3.1.

En el caso de los usuarios de datos, en el enlace ascendente, la capacidad era de entre 9 y 10 usuarios, dependiendo al igual que en caso de usuarios de voz del valor del parámetro σ_c . Por lo que, al igual que en el caso de usuarios de voz, la capacidad queda limitada por el enlace ascendente.

Al igual que hicimos para en el enlace ascendente, ahora se va a realizar un análisis en mayor profundidad, para ver como varían estos valores de capacidad si cambiamos al valor de alguno de los parámetros definidos en la Tabla 3.2.

En las siguientes tablas, se puede observar como varía la capacidad del sector si se varía los siguientes parámetros:

3.4.3.1 Influencia de los parámetros en la capacidad

➤ **Variación de s_1 :**

	Voz	Datos
$s_1=2$	400.47	73.95
$s_1=2.1$	399.18	73.67
$s_1=2.2$	396.87	73.29

Tabla 3-4: Variación de la capacidad en función del parámetro s_1

Como se puede observar en la tabla, el parámetro s_1 no influye prácticamente nada en la capacidad media (a penas existe una variación de dos usuarios), aunque si se puede deducir que un aumento del valor de s_1 reduce la capacidad.

➤ **Variación de s_2 :**

	Voz	Datos
$s_2=4$	400.47	73.95
$s_2=5$	452.58	83.57
$s_2=6$	479.04	88.47

Tabla 3-5: Variación de la capacidad en función del parámetro s_2

En la Tabla 3.5, se puede ver como el parámetro s_2 influye más que el parámetro s_1 en la capacidad media del sector, siendo mayor la capacidad para valores mayores del parámetro s_2 . En el caso de usuarios de voz, la capacidad media varía entorno a 80 usuarios entre los valores límites representados de s_2 , mientras que en el caso de usuarios de datos, la variación es de aproximadamente 15 usuarios.

➤ **Variación de σ_1 :**

	Voz	Datos
$\sigma_1=2.5$	400.58	73.96
$\sigma_1=3$	400.47	73.95
$\sigma_1=3.5$	400.33	73.92

Tabla 3-6: Variación de la capacidad en función del parámetro σ_1

Como se puede observar, la variación del parámetro σ_1 , no tiene ninguna repercusión en la capacidad media de usuarios de cualquiera de los dos servicios.

➤ **Variación de σ_2 :**

	Voz	Datos
$\sigma_2=5$	442.23	81.66
$\sigma_2=6$	400.47	73.95
$\sigma_2=7$	354.07	65.63

Tabla 3-7: Variación de la capacidad en función del parámetro σ_2

Al igual que pasaba con los parámetros s_1 y s_2 , son los parámetros de la segunda pendiente los que más influyen en la capacidad media. En el caso de σ_2 , entre sus valores 5 y 7, la capacidad de usuarios de voz varía alrededor de 88 usuarios, mientras que para usuarios de datos la variación es de 16 usuarios, siendo mayor para valores más bajos del parámetro σ_2 .

➤ **Variación de C_{do} :**

	Voz	Datos
$C_{do} = 0$	285.85	54.21
$C_{do} = 0.5$	400.47	73.95
$C_{do} = 1$	507.01	93.77

Tabla 3-8: Variación de la capacidad en función del parámetro C_{do}

La correlación también juega un papel importante en la capacidad media, siendo esta mayor cuando el valor de la correlación es 1. Como se puede ver en la tabla, entre los valores del parámetro C_{do} de 0 y 1, los usuarios de voz varían en más de 220 usuarios, mientras que la variación de los usuarios de datos es de 39 usuarios.

➤ **Variación de P_t :**

	Voz	Datos
$P_t = 0.5W$	398.76	73.61
$P_t = 1W$	400.47	73.95

Tabla 3-9: Variación de la capacidad en función del parámetro P_t

El valor de la potencia de transmisión tiene un efecto muy pequeño en la capacidad media, siendo entre valores de la potencia de transmisión de 0.5W y 1W de 2 usuarios de voz. Para los usuarios de datos, la capacidad se mantiene prácticamente igual.

➤ **Variación de R_b :**

	Voz	Datos
$R_b=200m$	397.12	73.32
$R_b=300m$	400.47	73.95
$R_b=400m$	405.54	74.86

Tabla 3-10: Variación de la capacidad en función del parámetro R_b .

Como se puede observar en la Tabla 3.10, el parámetro que define el “punto de ruptura” R_b , influye muy poco en la capacidad media, siendo esta mayor para valores de R_b más altos. Para usuarios de voz apenas aumenta 8 usuarios entre los valores de R_b de 200m y 400m, y en el caso de los usuarios de datos el aumento se reduce a 1 usuario.

3.5 Conclusiones de WCDMA

Se han realizado varios análisis de la capacidad de WCDMA en el entorno de las autopistas, siendo de muy buena ayuda las conclusiones que se pueden sacar de ello. Primero, se ha realizado un análisis con sus respectivos resultados prácticos del enlace ascendente. De ello, se han sacado las siguientes conclusiones.

Por un lado, se ha realizado un estudio de la probabilidad de desbordamiento para un número de usuarios por sector, dividiendo este estudio en 3 fases: usuarios de voz, usuarios de datos y usuarios de voz y datos conjunto.

Para los usuarios de voz, se tiene que para una probabilidad de desbordamiento del 1%, y cogiendo por ejemplo un control de potencia con parámetro σ_c con un valor de 0.75 dB, se tiene que la capacidad es aproximadamente 58 usuarios de voz por sector, siendo el sector de un tamaño aproximado de 1 km. Para los usuarios de datos, la capacidad es mucho menor debido a que la cantidad de información que se transmite es mucho mayor, siendo para los mismos parámetros anteriores de entre 10 y 11 usuarios de datos. En el análisis conjunto de voz y datos, y fijando el número de usuarios de datos a 5, se tiene que con las mismas condiciones anteriores, la capacidad es de aproximadamente 33 usuarios de voz.

También hicimos este mismo análisis, pero teniendo en cuenta que cada sector puede ser de diferente tamaño. Para ello se define 10 sectores diferentes, con rangos de entre 800 y 1200 metros, y se puede ver que no cambia mucho la capacidad, no siendo así si incluimos sectores de 2000 metros o más. Para un radio de sector grande, la capacidad del sector se reduce monótonamente. En la práctica, R tiene un valor de entre 1000 y 1500 metros. El rango de sector óptimo que da la máxima capacidad para un R_b de 300 metros es del orden de 800 a 1200 metros.

Por otro lado, se ha hecho un análisis de la capacidad dependiendo de diferentes factores como por ejemplo la distancia de corte, el rango del sector, s_1 y s_2, \dots también teniendo en cuenta usuarios de voz, datos y voz y datos conjunto.

La distancia de corte " R_b " es otro parámetro que no es tan determinante en la capacidad. Se ha probado para valores de R_b de entre 200 y 600 metros, y la capacidad se mantiene más o menos constante, no llegando a variar en la franja dicha ni un usuario. Se puede ver, que la capacidad del sector se reduce muy poco con el incremento de R_b .

Tanto para s_1 , s_2 y SII, la capacidad disminuye a medida que se aumenta estos parámetros con los valores mostrados en los apartados anteriores. Por ejemplo, se puede ver que a medida que reducimos el valor de SII, se incrementa la capacidad del sector. Una antena con un nivel de lóbulos lateral de azimuth de -15dB o mejor, es una buena elección.

Con estos resultados, dependiendo de la situación real en la que nos podamos encontrar, se pueden ver diferentes valores de los parámetros, dependiendo de lo que se necesite, realizando un compromiso entre la capacidad que se quiere dar tanto de usuarios de voz como de usuarios de datos, así como el coste disponible a la hora de realizar el diseño. Hay parámetros como pueden ser s_1 , s_2, \dots que no se puede modificar como se quiera, ya que dependen de las condiciones del escenario. En cambio, parámetros como el radio del sector R, o el punto de ruptura (que depende de la altura a la que esté la antena en la estación base), sí se les puede poner los valores que se consideren.

Una vez hecho todos estos cálculos, se puede ver que el 98% de las interferencias son debidas a la región S0. Por tanto, el modelo de 5 microceldas es suficiente para calcular las estadísticas de interferencia.

Concluimos respecto al enlace ascendente, para los valores de los parámetros designados en la Tabla 3.1, la capacidad práctica es de unos 57 usuarios de voz, unos 9 usuarios de datos, y en el caso mixto en el que se tiene tanto usuarios de voz como de datos, para un número de usuarios de datos de 5, se puede tener unos 34 usuarios de voz.

En un segundo análisis, se ha realizado un estudio teórico con sus correspondientes resultados prácticos del enlace descendente de WCDMA.

Con los resultados obtenidos se puede ver que el enlace descendente no limita la capacidad media en WCDMA, ya que para el caso general, se podría dar servicio a 400 usuarios de voz y 50 de datos aproximadamente, mientras que para el enlace ascendente, esta capacidad se reduce a 57 usuarios de voz y 9 de datos.

Por todo ello, se concluye finalmente que la capacidad de los sistemas WCDMA queda limitada por la capacidad del enlace ascendente, teniendo en las condiciones mostradas en la Tabla 2.1, una capacidad de aproximadamente 57 usuarios de voz y 9 de datos.

4 Sistemas INFOSTATIONS en autopistas

En este capítulo se va a analizar el sistema de comunicaciones móviles INFOSTATIONS. Después de una breve introducción acerca de esta tecnología y los conceptos claves necesarios para la comprensión del posterior análisis, se va a definir el modelo de propagación y se va a realizar un profundo estudio teórico de la cobertura de Infostation, sacando conclusiones reales a partir del análisis teórico.

4.1 Introducción de Infostations

Las tecnologías celulares están diseñadas para dar un servicio de comunicaciones en cualquier lugar de las células. Estas se colocan de tal manera que los usuarios móviles pueden mantener el servicio continuo al pasar de una célula a otra. Sin embargo, las transmisiones de datos en la actualidad son costosas. Los sistemas celulares de tercera generación prometían mayores tasas de datos de las que se dispone actualmente, pero no se pueden abordar los costes y los problemas de energía que esto conlleva.

Las redes celulares proporcionan "en cualquier momento y en cualquier lugar" el servicio necesario para los mensajes urgentes. Sin embargo, para muchos servicios de información, el servicio "en cualquier momento y en cualquier lugar" no es necesario, y se pueden proporcionar mayores tasas de datos, con un menor consumo de energía, y un menor coste.

Infostations ofrece una alta conectividad inalámbrica de banda ancha en áreas de cobertura aisladas, permitiendo a los usuarios móviles conseguir la información que necesitan a medida que pasan a través de un área de cobertura. Este paradigma es útil cuando el usuario puede tolerar algunas demoras a cambio de bajos costes del servicio.

Infostations utiliza la tecnología de LAN inalámbrica, con la que puede proporcionar datos con servicios de bajo coste, y alcanzar tasas considerablemente más altas que los sistemas actuales o emergentes. Sin embargo, en contraste con los sistemas celulares, infostations es una oferta de servicios en lugares aislados, dando una cobertura discontinua. Típicamente un infostation podría tener un alcance máximo de unos 300 metros a una velocidad máxima de transmisión de 11 Mbps mediante IEEE802.11b.

El Infostation emitiría una "señal" periódicamente para alertar a los terminales móviles de su presencia mientras emite datos a los usuarios. Cuando un terminal móvil entra en el rango de transmisión de la infostation, detecta la señal transmitida por la infostation. Una aplicación típica de un infostation es la emisión por ciclos. Cada ciclo contiene un índice con información sobre los elementos de datos que serán transmitidos durante ese ciclo. De esta manera, los terminales mediante dicho índice, pueden determinar cuando requieren de los datos emitidos, y de esta manera pueden escucharlos y descargárselos sólo en esos momentos. Los terminales también son capaces de enviar solicitudes de datos específicos a la infostation mientras estén en el rango de cobertura.

Hay investigaciones abiertas sobre los problemas que puede tener la tecnología de Infostation, como son:

- Protocolos MAC especializados para la transmisión eficiente de datos
- Algoritmos eficientes de propagación para el desarrollo del modelo de infostation
- Seguridad y procedimientos de autenticación
- Modelos de conservación de energía para el uso de los terminales de infostations
- Técnicas de codificación de datos para el uso eficiente del medio de difusión

4.1.1 Enfoque

Un Infostation consta de un punto de acceso 802.11 junto con un servidor, que está conectado a Internet. Antes de llegar a una Infostation, los usuarios seleccionan las categorías de información que son de su interés. Cuando el usuario pasa a través del área de cobertura de la Infostation, el sistema determina automáticamente cuál de los elementos de datos disponibles en el Infostation son de interés y los descarga. Esto se hace sin la intervención del usuario móvil. Dado que muchos elementos de información serán de interés para los numerosos usuarios al mismo tiempo, los datos de difusión y multidifusión se utilizan para muchas de las transferencias de datos.

Los temas de investigación abiertos, incluyen el diseño de algoritmos y protocolos para maximizar la probabilidad de que los usuarios recibirán con éxito la información que necesitan en el rango de cobertura de un Infostation. Además, también están abiertos temas como los algoritmos de coordinación entre Infostations y con los sistemas celulares, las técnicas de conservación de energía en el terminal móvil, y los protocolos para la carga y el envío de información desde el terminal del usuario a través de la Infostation.

El sistema Infostations proporciona a bajo coste y con un retraso insensible de los datos, una alta velocidad de transmisión de datos, de forma intermitente debido a la cobertura discontinua. Los factores clave que afectan a maximizar la cantidad de información descargada de la infostation incluyen las características del canal, la velocidad del usuario, la distancia entre el usuario y la infostation así como las tecnologías subyacentes utilizadas en la infostation.

En general, se aumenta el rendimiento cuando la distancia entre la infostation los usuarios es menor. En el apartado 4.13, se proporciona un marco matemático para calcular el rango de cobertura de este sistema, con diferentes valores de los parámetros que influyen en el cálculo teórico de dicha cobertura, mientras los usuarios pueden estar en cualquier zona del rango de cobertura de un infostation. A partir de este marco matemático, se van a sacar una serie de conclusiones reales, que nos ayudarán a tener datos sobre el rango de cobertura que puede proporcionar este sistema.

4.2 La cobertura en Infostations

En los primeros años de la revolución celular, el servicio de voz se ha convertido en algo común y ubicuo, y ahora la atención de los investigadores se centra en la información inalámbrica.

Es evidente que los servicios de información tienen un potencial casi ilimitado en el entorno inalámbrico. Recientemente ha sido propuesto un nuevo sistema de comunicaciones que recibe el nombre de INFOSTATION, basado en una serie de puertos inalámbricos.

Infostations está definida como un sistema de comunicaciones inalámbricas caracterizado por un acceso de usuarios secuencial con áreas de cobertura discontinuas y una alta velocidad de transmisión de datos.

En contraposición a la moderada tasa de cobertura ubicua de sistemas celulares, infostations ofrece una alta velocidad con cobertura discontinua a la que podrá acceder un usuario transitorio que esté cerca de un infostations (estación de información).

Por otra parte, la eliminación de la necesidad de tener que coordinar los canales para múltiples usuarios y del sistema en su conjunto, hace que las realizaciones sean simples y de bajo coste. Y debido a la naturaleza intrínseca de las comunicaciones de datos basadas en ráfagas que toleran un retardo moderado, el escenario de infostations, con una inherente bajada de costes, puede ser una alternativa atractiva a la concepción clásica de las redes de comunicaciones en cualquier momento y en cualquier lugar.

El sistema Infostations podría estar situado a lo largo de las carreteras, en aeropuertos, campus,..., y puede facilitar el acceso a Internet y / o el acceso a los servicios gestionados a nivel local.

Por lo tanto, se puede definir un Infostations como una pequeña zona aislada de cobertura (cientos de metros), con una conexión de ancho de banda alta (por lo menos un megabit por segundo) que recoge solicitudes de información y entrega datos mientras los usuarios están dentro del área de cobertura.

La tasa de bit disponible depende de la distancia entre el usuario móvil y el centro del área de cobertura del infostations, aumentando al disminuir la distancia.

Se va a estudiar el rendimiento de Infostations en 2, 4 y 6 bandas de frecuencia. Sacaremos conclusiones de cómo afecta a la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias (SINR) utilizar las diferentes dimensiones de cobertura, así como ver como influyen los diferentes parámetros en la misma.

A su vez, haremos un estudio teniendo en cuenta las 8 estaciones interferentes más cercanas a la estación base (ya que realmente las interferencias serían infinitas, pero a partir de una cierta distancia se pueden considerar despreciables), y siempre teniendo en cuenta la varianza de la interferencia.

Las condiciones de este estudio, que describen en microceldas el sistema Infostations en una autopista usando un modelo con forma de cigarro son:

- El número de sectores direccionales en la celda con forma de cigarro de infostations es 2, y usamos una antena direccional por cada sector.
- La distancia típica entre dos infostations es 2 Km.

El objetivo de este trabajo es investigar y presentar un modelo para calcular la cobertura de los infostations teniendo en cuenta el valor esperado y la varianza de las señales interferentes.

A continuación se va a realizar un análisis del modelo de propagación. El motivo por el que se vuelve a repetir este apartado, es que se quiere realizar un análisis de cada una de las tecnologías por separado, atendiendo a una posible demanda de alguno de los capítulos de forma independiente.

4.2.1 Modelo de propagación

Para calcular la capacidad del sistema W-CDMA en las autopistas se va a utilizar un modelo basado en la propagación sobre la tierra plana en el que están presentes dos exponentes de propagación diferentes para dos tramos, como se puede ver en la Figura 4.1, en los cuales, para cada uno de los tramos, se dará el valor medio de pérdidas de propagación más el efecto de shadowing que se presenta por una distribución Log-normal.

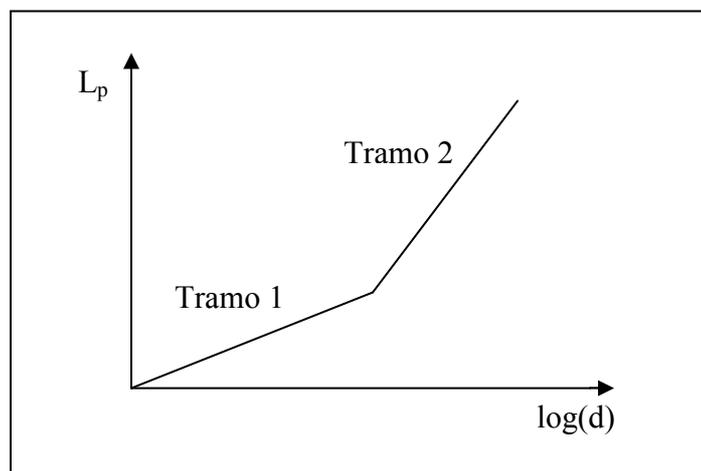


Figura 4-1: Modelo basado en la propagación sobre la tierra plana. Dos tramos, cada uno con un exponente de propagación

El exponente de propagación del primer tramo se denomina s_1 y está presente hasta el punto de corte conocido también como R_b , a partir de este punto pasamos a hablar del exponente de propagación s_2 .

Las pérdidas ocasionadas serán un aspecto muy relevante en el estudio de la capacidad del número de usuarios. A ello hay que añadir el estudio de la región de cobertura (llamado también R en el análisis llevado a cabo).

En primer lugar, se va a definir las pérdidas de propagación [1]:

$$\begin{cases} L_p (dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + \xi_1, & \text{si } r \leq R_b \\ L_p (dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + \xi_2, & \text{si } r > R_b \end{cases} \quad (4.1)$$

Las pérdidas básicas “L_b” y el punto de ruptura “R_b” vienen dadas por las siguientes fórmulas:

$$L_b (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10s_1 \log_{10} (R_b) \quad (4.3)$$

$$R_b \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda} \quad (4.4)$$

Donde,

- h_b es la altura de la antena de la estación base.
- h_m es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario.
- λ es la longitud de onda.
- ξ₁ y ξ₂ son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar σ₁ y σ₂ respectivamente.

A continuación se exponen los valores más comunes de los exponentes de propagación y las desviaciones estándar para microceldas del tipo Cigar-Shaped en Infostation:

$$s_1 = 2 \text{ a } 2.2$$

$$s_2 = 4 \text{ a } 5$$

$$\sigma_1 = 2.5 \text{ a } 3.5 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 5 \text{ a } 7 \text{ dB}$$

$$R_b = 300 \text{ m}$$

$$L_g = 3 \text{ dB}$$

4.2.2 Análisis de la cobertura en Infostation

Usando el modelo de propagación de dos pendientes mencionado en el apartado anterior, se va a calcular los estadísticos de interferencia [2] (valor medio y varianza) para encontrar la cobertura de Infostation.

La Figura 4.2, muestra la configuración de las 8 infostation con celdas en forma de cigarro que se tiene en cuenta en el análisis.

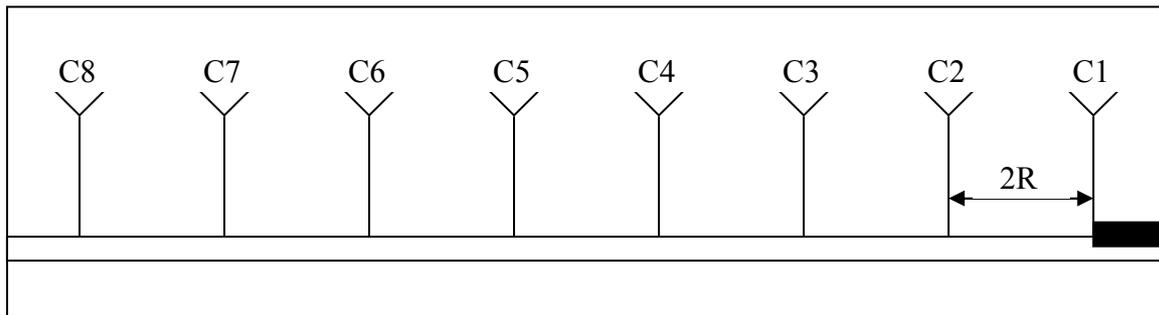


Figura 4-2: Modelo de infostation de 8 celdas en forma de cigarro

Por su parte, la Figura 4.3 muestra el diagrama de radiación de las dos antenas utilizadas en cada infostation. Se asume que las infostation estarán espaciadas regularmente a una distancia $2R$. El rendimiento de las infostation será estudiada considerando el sector derecho de la infostation C1.

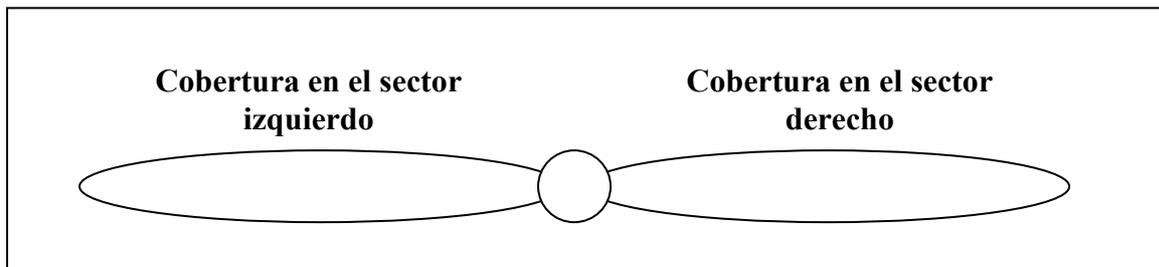


Figura 4-3: Diagrama horizontal de radiación de las dos antenas direccionales usadas en cada infostation

El usuario i está a una distancia r_{id} de la infostation bajo estudio ($C1$) y a una distancia r_{io} de la infostation interferente, como se ve en la Figura 4.4.

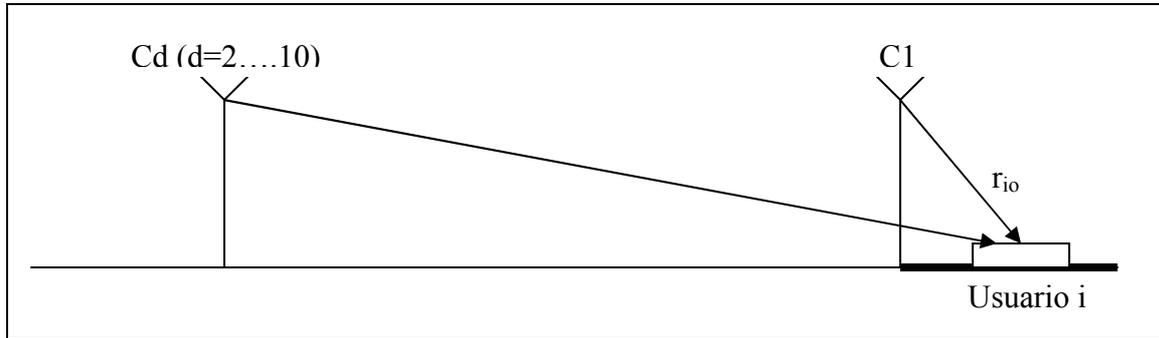


Figura 4-4: Diagrama esquemático del escenario infostation con un usuario móvil en celdas de autopistas

Con todo ello, la interferencia normalizada $L(r_{id}, r_{io})$ debida únicamente a la distancia viene dada por las siguientes fórmulas (dependiendo del valor de estas distancias respecto a R_b) es:

- Si r_{id} y $r_{io} \leq R_b$ (caso no práctico):

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (4.5)$$

- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{io} \leq R_b$:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{R_b} \right)^{s_1} \left(\frac{R_b}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (4.6)$$

- Si r_{id} y $r_{io} > R_b$:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (4.7)$$

Estos cálculos tienen solo en cuenta la distancia; si se quiere calcular la señal de interferencia $I(r_{id}, r_{io})$ debido a la distancia y al shadowing, se deberá usar la siguiente fórmula:

$$I(r_{id}, r_{io}) = 10^{(\xi_{id} - \xi_{io})/10} L(r_{id}, r_{io}) \quad (4.8)$$

Siendo,

- Si r_{id} y $r_{io} \leq R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_1$ y $\xi_{io} = \xi_1$
- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{io} \leq R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{io} = \xi_1$

- Si r_{id} y $r_{io} > R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{io} = \xi_2$

La potencia recibida de la señal deseada viene dada por:

$$P_r = P_t 10^{-(L_{or}(dB) - G_{tx}(dB) - G_{rx}(dB))/10} \quad (4.9)$$

Donde,

- P_t , es la potencia transmitida de la infostation en cada una de las dos direcciones.
- L_{or} , es la pérdida (medida en dB) debida a la distancia “r” que existe entre la infostation bajo estudio y el usuario.
- G_{tx} , es la ganancia de la antena de la estación base medida en dB
- G_{rx} , es la ganancia de la antena móvil que se asume que es 0 dB.

La ecuación anterior puede reescribirse como:

$$P_r = k P_t \quad (4.10)$$

Donde k es,

$$k = 10^{-(L_{or}(dB) - G_{tx}(dB) - G_{rx}(dB))/10} \quad (4.11)$$

En L_{or} , el efecto tanto de la distancia como del shadowing está incluido. Para una disponibilidad “ α ” dada, L_{or} viene dada por:

$$\begin{cases} L_{or}(dB) = L_b + 10 s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \sigma_1 Q^{-1}(\alpha), & \text{if } r \leq R_b \\ L_{or}(dB) = L_b + 10 s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \sigma_2 Q^{-1}(\alpha), & \text{if } r > R_b \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\quad (4.13)$$

Donde $Q^{-1}()$ es la inversa de la función Gaussiana Q, definida por la siguiente ecuación:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2/2} dy \quad (4.14)$$

La función $Q^{-1}()$ tiene un valor de 2.05 para una disponibilidad del 98%, y 2.34 para un valor de disponibilidad del 99%.

El valor esperado de la potencia interferente debido a las demás infostation (de la 2 a la 8) viene dado por:

$$E[I] = P_r \sum_{d=2}^8 e^{(\beta^2 \sigma^2 / 2)} L(r_{id}, r_{io}) Q \left[\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma} \right] \quad (4.15)$$

Donde,

- β , tiene un valor de $(\ln 10)/10$
- σ , es la desviación estándar ($\xi_{id} - \xi_{io}$)
- Q , es la función Gaussiana definida anteriormente

El valor de σ^2 , viene dado por:

- Cuando r_{id} y $r_{io} \leq R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_1$ y $\sigma_{io} = \sigma_1$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_1^2 \quad (4.16)$$

Donde C_{do} es el coeficiente de correlación debido a los parámetros de shadowing ξ_{id} y ξ_{io} .

- Cuando $r_{id} > R_b$ y $r_{io} \leq R_b$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{do}) \sigma_1 \sigma_2 \quad (4.17)$$

- Cuando r_{id} y $r_{io} > R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_2$ y $\sigma_{io} = \sigma_2$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_2^2 \quad (4.18)$$

La varianza de la potencia interferente viene dada por,

$$\text{var}[I_{inter}] = P_r^2 \sum_{d=2}^8 e^{2(\beta^2 \sigma^2)} L(r_{id}, r_{io})^2 \left\{ g \left(\frac{r_{id}}{r_{io}} \right) - f^2 \left(\frac{r_{id}}{r_{io}} \right) \right\} \quad (4.19)$$

Donde,

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[2\beta\sigma + \frac{10\log_{10}\{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (4.20)$$

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[\beta\sigma + \frac{10\log_{10}\{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (4.21)$$

Para un valor de disponibilidad “ α ” dado, la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias o SINR del usuario bajo estudio viene dado por,

$$SINR = \frac{S}{N + I} = \frac{P_r}{E[I] + P_N + Q^{-1}(\alpha)\sqrt{\text{var}[I]}} \quad (4.22)$$

Donde P_N es el ruido térmico del receptor móvil.

4.2.3 Resultados de la cobertura de Infostations

Usando los algoritmos presentados en el apartado 4.2.3, se va a pasar a describir los resultados numéricos obtenidos.

Para ello, se ha utilizado un código desarrollado mediante Matlab, en el que se define los parámetros según los siguientes valores:

$C_{do} = 0.5$
$s_1 = 2$
$s_2 = 4$
$\sigma_1 = 3 \text{ dB}$
$\sigma_2 = 6 \text{ dB}$
$R_b = 300 \text{ m}$
$R = 1000 \text{ m}$
$\alpha = 0.99$
$P_t = 0.1 \text{ W}$
$P_N = -100 \text{ dBm}$
$G_{tx} = 10 \text{ dB}$
$G_{rx} = 0 \text{ dB}$
Frecuencia = 2.4 GHz

Tabla 4-1. Valores de los parámetros para Infostation

Dependiendo del esquema de modulación que se quiera, se necesitará diferentes valores del SINR. Según la siguiente Tabla 4.2, si se tiene un SINR superior a 23.5dB (mostrado en las gráficas mediante una línea horizontal negra), podremos trabajar con todos los esquemas de modulación 64QAM, que son los que nos interesan.

Orden	Esquema de modulación	SINR requerido (dB)
1	64 QAM 2/3	23.5
2	64 QAM 3/4	24.4
3	64 QAM 5/6	26.0
4	64 QAM 7/8	27.5

Tabla 4-2. Esquemas de modulación y su asociación con el SINR

Lo primero que se va a hacer es ver la influencia que tiene el número de bandas con las que se haga el estudio. Utilizaremos los modelos de 2, 4 y 6 bandas de frecuencia.

4.2.3.1 Influencia del número de bandas de frecuencia en la distancia máxima

Para ello, se va a mostrar una gráfica conjunta que muestra el SINR (relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias) frente a la distancia que hay entre el usuario y la estación base, para cada uno de los casos. Tanto en este caso general como en los siguientes análisis de la influencia de los parámetros, se ha tenido en cuenta las interferencias de las 8 estaciones más cercanas.

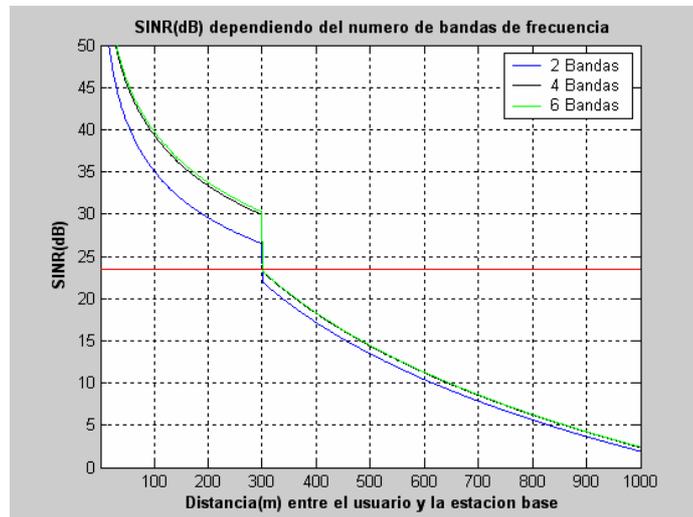


Figura 4-5: SINR dependiendo del número de bandas de frecuencia

Como se puede ver en la Figura 4.5, un aumento de la distancia entre el usuario y la estación base produce una disminución en el SINR. Esto es debido a que un aumento de la distancia reduce el valor del SNR y del SIR, lo que produce una disminución en el SINR, ya que al aumentar la distancia se reduce la potencia recibida y aumentan las interferencias, por lo que la relación de la potencia recibida con el ruido disminuye.

Si nos fijamos en el tramo de la gráfica hasta el punto de ruptura situado en 300 metros, se puede ver como el SINR para los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia apenas se distingue, mientras que para el caso de 2 bandas de frecuencia se observa que el SINR es menor que para los otros dos casos.

Si nos fijamos en el punto en el que las curvas cortan con el requisito que se ha impuesto de que haya un SINR umbral de 23.5dB, se puede ver como para los 3 casos bajo estudio, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros, distancia que coincide con el punto de ruptura.

Con ello se puede deducir, que la utilización de 4 bandas de frecuencia es suficiente a la hora de realizar una implementación de infostation, ya que la implementación de 6 bandas de frecuencia es más costosa, ya que se tiene que comprar el espectro de frecuencias utilizadas para poder tener la licencia sobre ellas. Por ello, a más bandas de frecuencia, más espectro de frecuencia se necesitará y mayor será el coste.

Con estos resultados, se puede concluir, que la cobertura de redes de infostation es discontinua, lo que quiere decir que no toda la distancia entre dos infostation está cubierta, y como se ha mostrado en la Figura 4.5, para cualquiera de los casos bajo estudio y teniendo como requisito un SINR umbral de 23.5dB, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros.

Si nos fijamos en la Tabla 4.2 (Pág.81), se puede ver para qué distancia se cumplen los diferentes SINR umbrales (determinados por los órdenes de modulación), y esa será la máxima distancia a la que podrá estar el usuario de la estación base (zona de cobertura) para cada uno de los servicios determinados por los órdenes de modulación.

4.2.3.2 Influencia del orden de modulación en la distancia máxima

A continuación, se va a ver de manera gráfica para cada uno de los casos, como afecta cada uno de los órdenes de modulación en la distancia máxima a la que puede estar el usuario de la estación base para cumplir el requisito del SINR umbral en cada caso de modulación:

- **2 bandas de frecuencia**

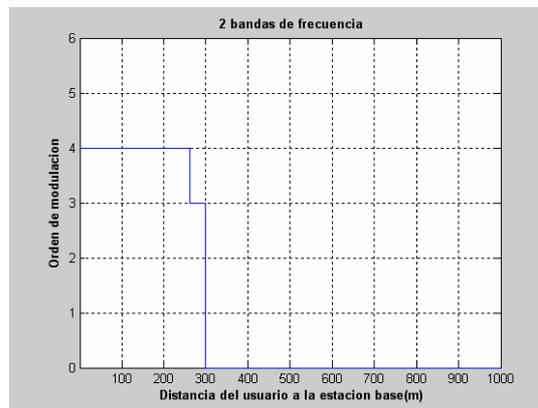


Figura 4-6: Distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base para cada orden de modulación en el caso de 2 bandas de frecuencia

Como se puede ver, en el caso de 2 bandas de frecuencia, a una distancia de 300 metros el orden de modulación se reduce a 0, por lo que no se podrá soportar ningún servicio cuando la distancia sea mayor. A su vez, el servicio con orden de modulación 4 únicamente podrá darse hasta una distancia de 263 metros.

- **4 bandas de frecuencia**

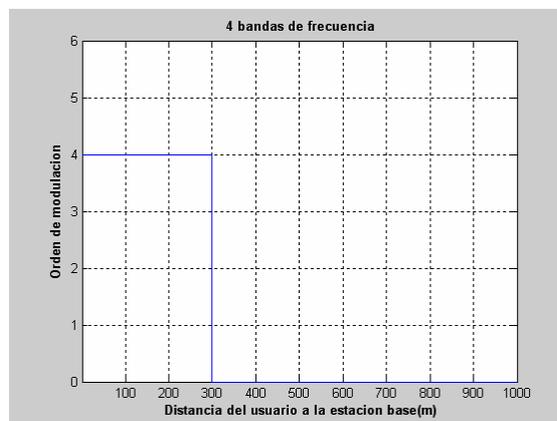


Figura 4-7: Distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base para cada orden de modulación en el caso de 4 bandas de frecuencia

- **6 bandas de frecuencia**

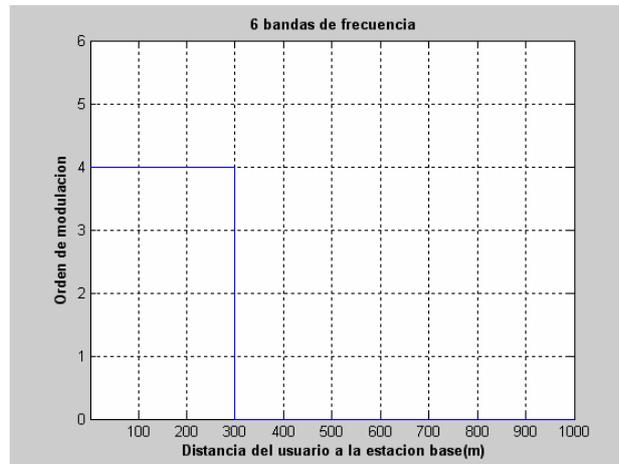


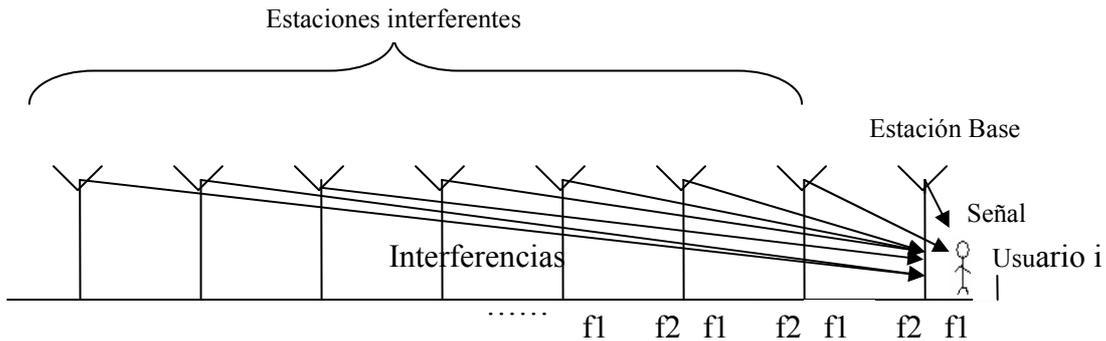
Figura 4-8: Distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base para cada orden de modulación en el caso de 6 bandas de frecuencia

Tanto para 4 como para 6 bandas de frecuencia, se puede soportar la modulación 64 QAM 7/8 hasta una distancia de 300 metros. A partir de ella, los usuarios no podrán recibir ningún servicio, ya que el orden de modulación se reduce a 0.

A continuación, se va a ver la influencia que tienen los diferentes parámetros en cada uno de los casos.

4.2.3.3 Dos bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros

La situación en la que nos encontramos es la siguiente:



La Figura 4.9, nos muestra como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_1 :

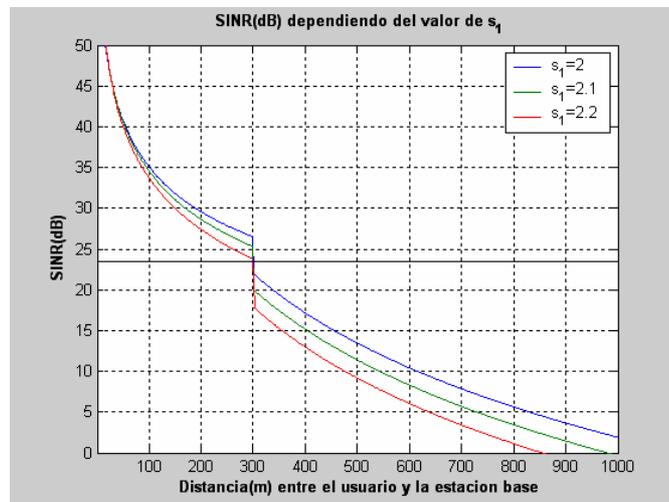


Figura 4-9: SINR dependiendo del valor de s_1

Si se quiere un SINR umbral de cómo mínimo 23.5dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), para los 3 valores representados de s_1 , se tiene que la distancia máxima a la que puede situarse el usuario es de 300 metros.

Además se puede observar para un valor más bajo de s_1 mejora el SNR por lo que se mejora el SINR.

En la Figura 4.10 se puede ver como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_2 :

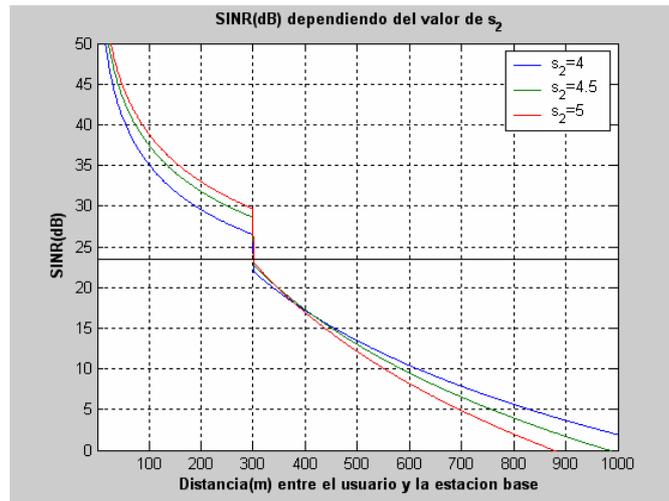


Figura 4-10: SINR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en la gráfica, si se tiene un SINR umbral de 23.5dB, para los 3 valores representados de s_2 , la distancia máxima a la que puede situarse el usuario es de 300 metros.

En este caso, se puede ver como dependiendo de la distancia, la influencia del parámetro varía completamente. Esta variación dependiendo de la distancia a la que se sitúe el usuario respecto a la estación base es debido a que en cada tramo de la gráfica influyen diferentes fenómenos. En el primer tramo (que es el que nos interesa), existe un mejor aislamiento, lo que produce una menor interferencia y por ello el SINR es mayor para valores más altos del parámetro s_2 .

En el caso de este parámetro, la variación de s_2 influye tanto en el SIR como en el SNR (en este caso la variación se observa únicamente a partir de la distancia R_b). Esto lo se puede ver observando las siguientes figuras, en las que se puede ver como varía tanto el SNR como el SIR al variar el parámetro s_2 :

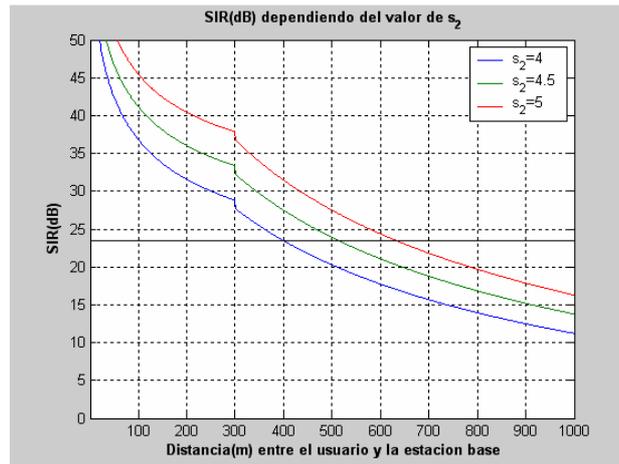


Figura 4-11: SIR dependiendo del valor de s_2

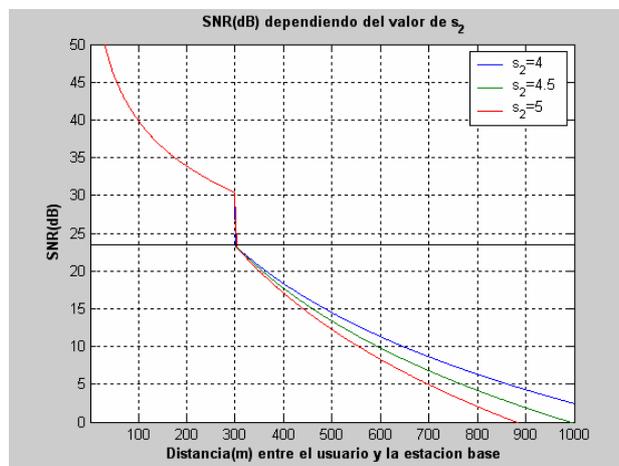


Figura 4-12: SNR dependiendo del valor de s_2

En la Figura 4.13, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de σ_1 .

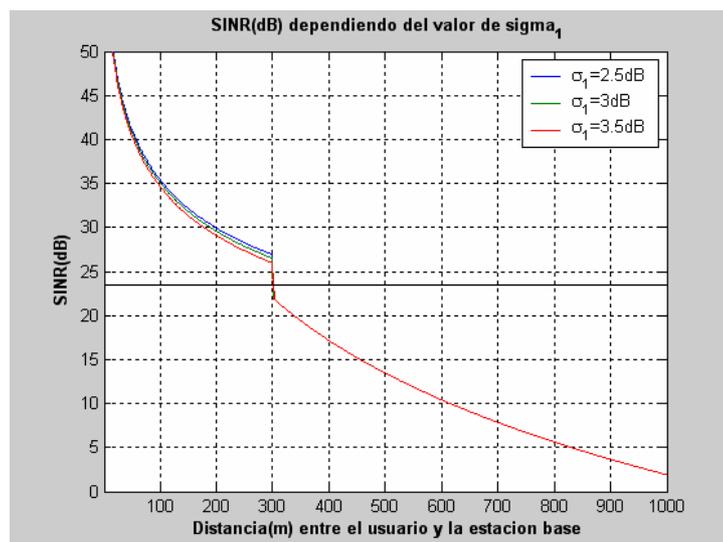


Figura 4-13: SINR dependiendo del valor de σ_1

Al igual que para los casos anteriores, para los 3 valores del parámetro σ_1 representados, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros.

Como se puede observar, la influencia depende de la distancia a la que se sitúe el usuario. Para distancias menores de 300m, se puede ver una pequeña variación de menos de medio decibelio entre los diferentes valores de σ_1 , que se puede considerar insignificante.

En la Figura 3.14, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de σ_2 .

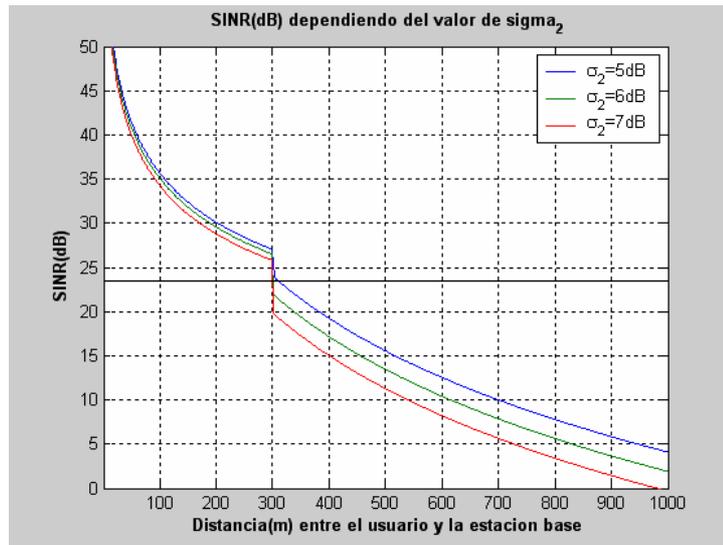


Figura 4-14: SINR dependiendo del valor de σ_2

Si nos fijamos en la influencia hasta una distancia de 300m, se puede observar que la influencia es muy pequeña ante la variación del parámetro σ_2 en el SINR.

En cambio, a partir de esta distancia, si se puede ver una mayor influencia de este parámetro. Si se quiere un SINR de cómo mínimo 23.5dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), para un $\sigma_2=5$ el usuario puede estar a una distancia máxima de 310m, que es un poco superior a la distancia máxima de los otros dos casos (6 y 7) que es de 300 metros, algo que coincide con el caso general.

Observando la gráfica, se dedujo que una disminución de σ_2 , aumenta el SIR y con ello el SINR. Esto es debido a que el incremento del valor de σ_2 , incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo de esta manera el SIR y con ello el SINR.

Con los resultados anteriores, se puede ver que el efecto de los parámetros de la primera pendiente (s_1 y σ_1) es menor que el efecto de los parámetros de la segunda pendiente (s_2 y σ_2) en el SINR, para el caso de 2 bandas de frecuencia.

En la Figura 4.15, se puede ver como influye la variación de la correlación de shadowing, determinada por el parámetro C_{do} , en la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias, determinada por el parámetro SINR.

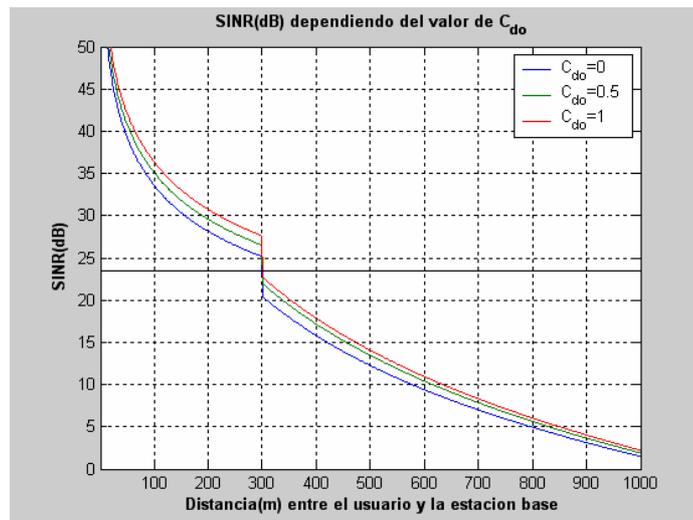


Figura 4-15: SINR dependiendo del valor de la correlación (C_{do})

Si nos fijamos en el punto en el que el SINR umbral de 23.5dB corta con las 3 curvas, se tiene que para los 3 valores representados de correlación, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario es de 300 metros.

Observando la gráfica se concluye que al aumentar la correlación se aumenta levemente el SINR, esto es debido a que un incremento en el C_{do} , reduce el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que se incrementa el SIR y con ello aumenta el valor del SINR.

En la Figura 4.16, se puede ver como influye en el SINR la variación de la frecuencia.

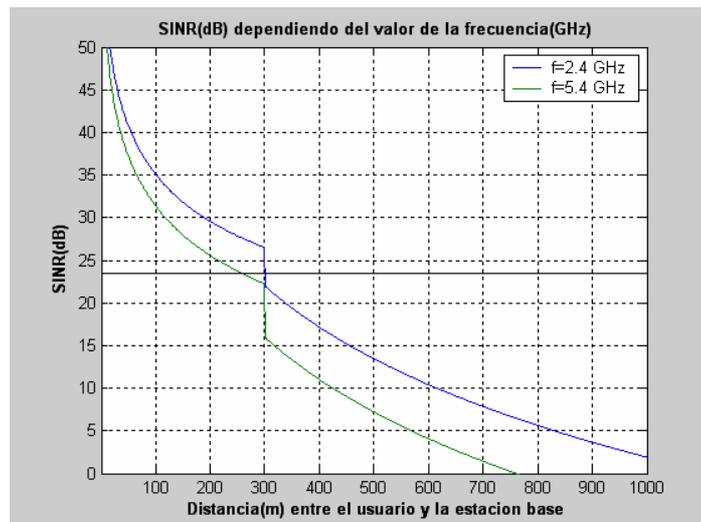


Figura 4-16: SINR dependiendo del valor de la frecuencia

Como se puede ver en la gráfica, un aumento de la frecuencia disminuye la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias. Esto es lógico, porque la frecuencia determina el valor de las pérdidas, y al aumentar la frecuencia, aumentan también las pérdidas. Por ello, lo que realmente disminuye al aumentar la frecuencia es el valor del SNR, y por ello, disminuye el SINR. En cambio, el valor del SIR se mantiene constante al variar la frecuencia, ya que se reduce proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia.

Se puede observar como, para un valor del SINR de 23.5dB y una frecuencia de 2.4GHz, se tiene que la máxima distancia a la que puede estar el usuario de la estación base es 300m, mientras que para el mismo valor del SINR pero a una frecuencia de 5.2GHz, esta distancia disminuye hasta un valor de un poco más de 258m.

Esta variación es debido a que cuando se incrementa el valor de la frecuencia de operación se incrementa el valor de las pérdidas de propagación, reduciendo de esta manera la potencia de la señal recibida y la potencia de las señales interferentes. En este caso, el efecto es grande y produce una reducción del SINR. Para una Potencia de transmisión alta, el efecto de la frecuencia de operación será menor y puede ser descuidada cuando la potencia de transmisión sea mayor a 1 W.

En la Figura 4.17, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de la distancia que hay entre las infostation (R es la mitad de la distancia entre las infostation).

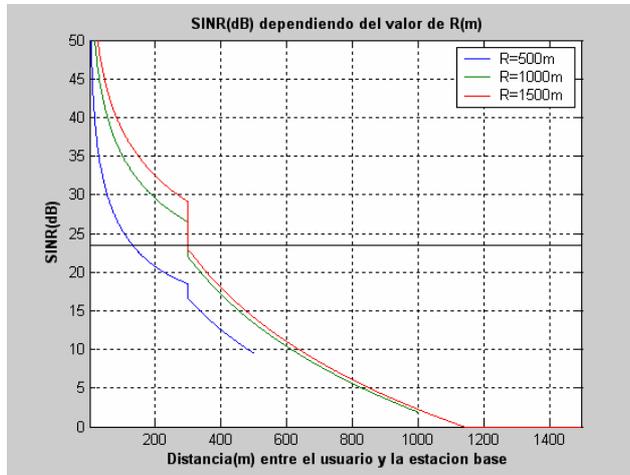


Figura 4-17: SINR dependiendo del valor de R (2R es la distancia entre las infostation)

Si nos fijamos en los puntos en los que corta la recta horizontal que refleja un SINR de 23.5dB con cada una de las curvas, se puede ver que para una R de 500 metros, la máxima distancia que puede haber entre la estación base y el usuario es de 131m. Para este caso, sólo se calcula el SINR hasta una distancia de 500m, ya que es el rango máximo del sector determinado por el parámetro R.

Tanto para un R de 1000m como de 1500 metros, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros.

Como conclusión, se tiene que cuando se aumenta la distancia que existen entre las infostation, se aumenta el SIR (manteniéndose constante el SNR, ya que tanto la potencia Recibida como la potencia de ruido se mantienen constantes) lo que conlleva a un aumento del SINR como se ha expuesto anteriormente. Esto es debido a que, para una distancia dada desde el infostation, reduciendo el valor de R se incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo así el valor del SIR, por lo que también se produce una reducción del SINR.

En la Figura 4.18, se puede ver como influye la variación de la potencia de transmisión en el SINR.

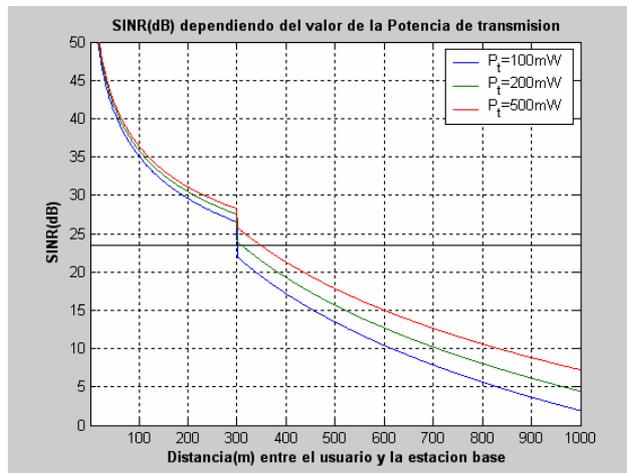


Figura 4-18: SINR dependiendo del valor de la Potencia de transmisión

Si nos fijamos en los puntos en los que corta cada una de las curvas con el SINR umbral situado en 23.5dB, se puede ver como para una Potencia de transmisión P_t de 100mW se tiene una distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base de 300m. Para una P_t de 200mW, esta distancia máxima aumenta a 310m, mientras que para el otro valor de P_t de 500mW, la distancia aumenta aún mas situándonos en 348 metros de distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base teniendo un SINR mínimo de 23.5dB.

Como se puede ver en la gráfica, a medida que se aumenta la potencia de transmisión aumenta la Relación Señal a Ruido e Interferencia. Esto es lógico ya que al aumentar la potencia de transmisión se aumenta proporcionalmente la potencia recibida, por lo que se aumenta el SNR (Relación señal a ruido) y con ello se produce un aumento en el SINR. Se debe tener en cuenta de que la Relación señal a interferencia SIR no varía con la variación de la potencia transmitida (las interferencias aumentan o disminuyen proporcionalmente con la potencia de transmisión), por lo que el motivo por el que varía el SINR es únicamente porque al aumentar la potencia de transmisión aumenta la potencia recibida, por lo que el SNR aumenta.

Esto lo se puede ver representando la influencia que tiene la variación de la potencia de transmisión en los parámetros SNR y SIR.

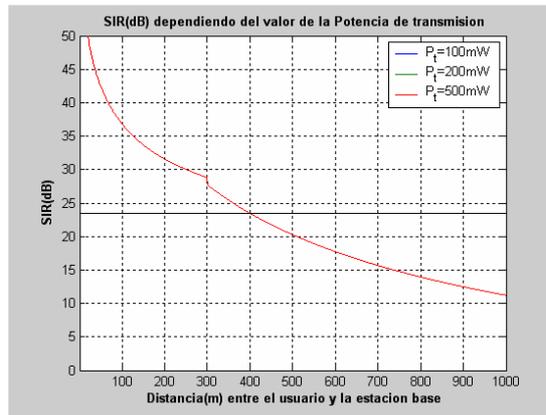


Figura 4-19: SIR dependiendo del valor de la Potencia de transmisión

Como se puede ver en la Figura 4.19, el SIR no varía cuando varía la potencia de transmisión. Esto es algo lógico ya que cuando aumenta la potencia de transmisión aumenta de manera proporcional las interferencias, por lo que no influye en la Relación señal a interferencia esta variación.

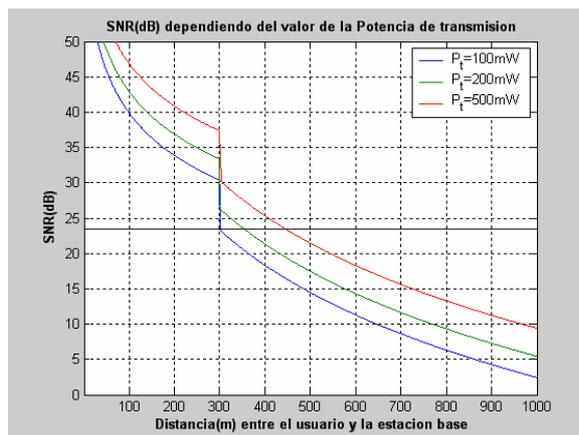


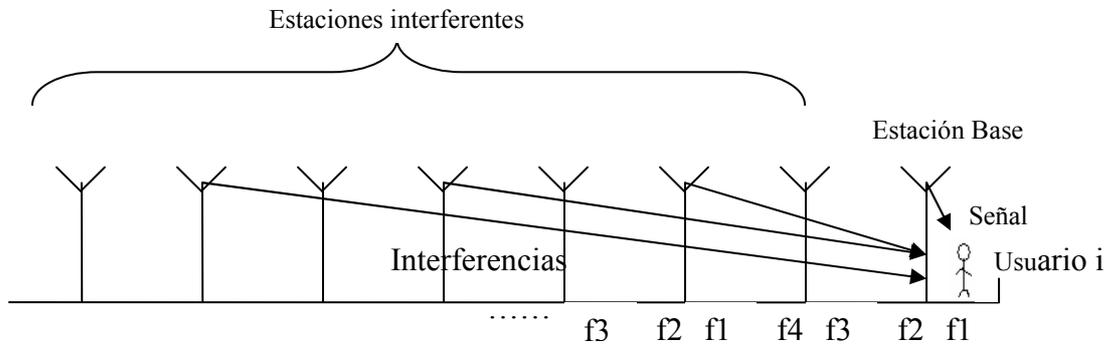
Figura 4-20: SNR dependiendo del valor de la Potencia de transmisión

En cambio, como se puede ver en la Figura 4.20, el SNR si que varía enormemente al variar la potencia de transmisión. Esta variación entre la relación de la señal y el ruido es lo que hace que influya la variación de la potencia de transmisión en el SINR.

A su vez, como ya se verá en los siguientes apartados, la potencia de transmisión influye de una manera mayor en el caso de 4 y 6 bandas de frecuencia que en el caso de 2 bandas de frecuencia. Esto es debido a que, en el caso de 2 bandas de frecuencia, la interferencia es mayor que en los otros casos, en cambio, para el caso de 6 bandas de frecuencia la interferencia es menor por lo que se nota más la influencia del ruido. Con ello, en el caso de 6 bandas de frecuencia, el SNR tiene una influencia mayor y por ello, la variación de la potencia de transmisión tiene mayor influencia en el SINR.

4.2.3.4 Cuatro bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros

La situación con la que nos encontramos es la siguiente:



La Figura 4.21, nos muestra como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_1 .

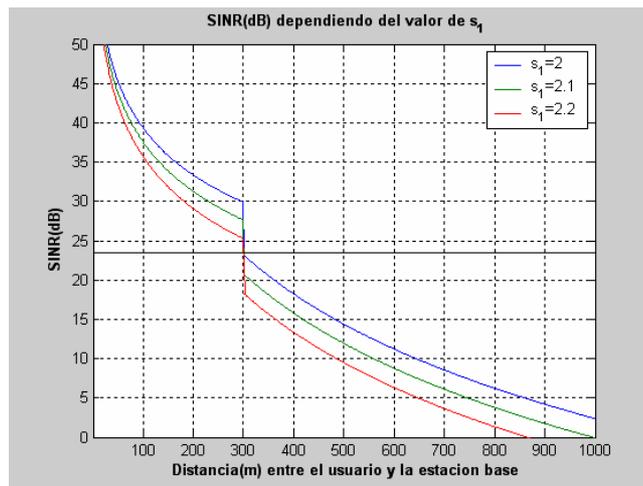


Figura 4-21: SINR dependiendo del valor de s_1

Si se quiere un SINR de cómo mínimo 23.5dB, para los 3 casos representados del parámetro s_1 , se puede ver como la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros. Además, el SNR mejora para un valor más bajo de s_1 , lo que hace que el SINR mejore también para un valor más bajo de s_1 .

En la Figura 4.22 se puede ver como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_2 .

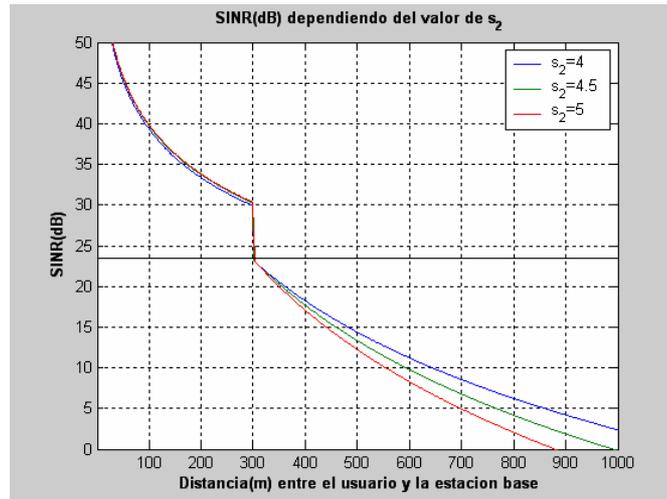


Figura 4-22: SINR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en la gráfica, para los 3 valores de s_2 representados, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros.

Como ya dijimos en el caso de 2 bandas de frecuencia, la variación del parámetro s_2 influye tanto en el SNR como en el SIR, lo que conlleva a una variación del SINR.

En la Figura 4.23, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de σ_1 .

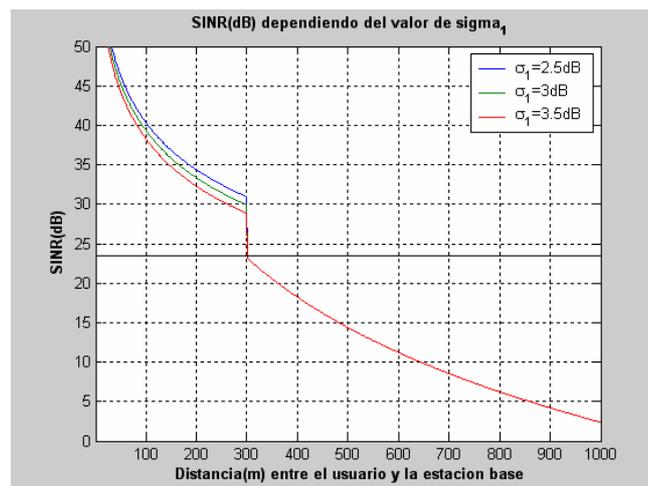


Figura 4-23: SINR dependiendo del valor de σ_1

Como se puede observar, la influencia es casi nula para distancias mayores a 300m. Si se quiere un SINR mínimo de 23.5 dB, se puede ver que la distancia máxima a la que se puede

encontrar el usuario es de 300m, algo que coincide con el caso general representado en la Figura 4.4.

En la Figura 4.24, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de σ_2 .

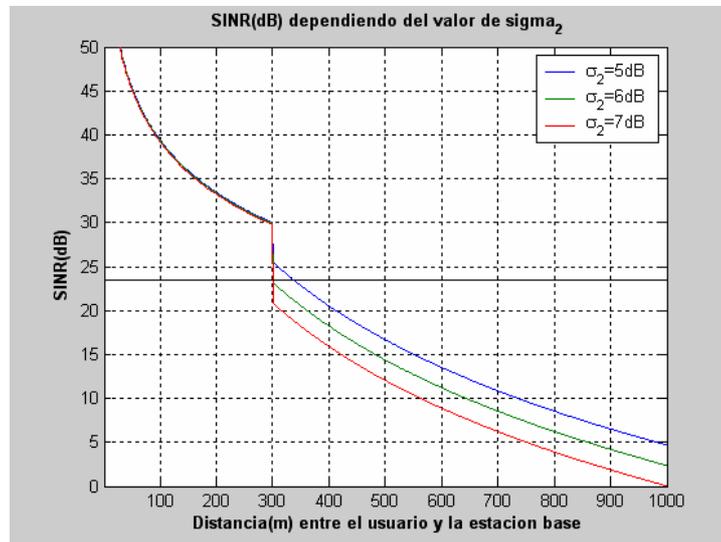


Figura 4-24: SINR dependiendo del valor de σ_2

Si nos fijamos en la influencia hasta una distancia de 300m, se puede observar que la influencia de la variación del parámetro σ_2 es prácticamente nula.

Si se quiere un SINR de cómo mínimo 23.5dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), para los 3 casos representados del parámetro σ_2 , la distancia máxima a la que puede situarse el usuario es de 300 metros respecto a la estación base.

En la Figura 4.25, se puede ver como influye la variación de la correlación de shadowing, determinada por el parámetro C_{do} , en la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias, determinada por el parámetro SINR.

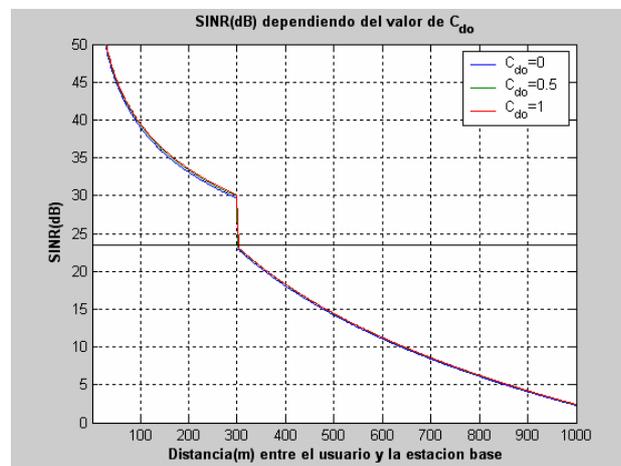


Figura 4-25: SINR dependiendo del valor de la correlación (C_{do})

Observando la gráfica, se podría decir que la influencia que tiene en el SINR la variación de la correlación (determinada por el parámetro C_{do}) es nula. Si nos fijamos en el punto en el que las diferentes curvas con el SINR umbral, se puede ver como para los 3 valores representados de correlación, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros.

Como ya vimos en el caso de 2 bandas de frecuencia, esta variación del SINR se debe únicamente a la variación de las interferencias. Por ello, si existe una influencia en el SIR pero no en el SNR.

Además, se puede ver como en este caso de 4 bandas de frecuencia, la influencia de la variación de la correlación es menor que en el caso de 2 bandas de frecuencia. Esto es debido a que a medida que se aumenta el número de bandas, la potencia de las interferencias disminuye (influye menos), y con ello, pasa a tener más importancia las pérdidas por ruido que por interferencia. Por ello, aunque si nos fijamos en el SIR si tiene una gran influencia la variación de la correlación, al reducirse el valor de la potencia de interferencia, esta variación deja de ser tan determinante a la hora de analizar el SINR.

En la Figura 4.26, se puede ver como influye en el SINR la variación de la frecuencia.

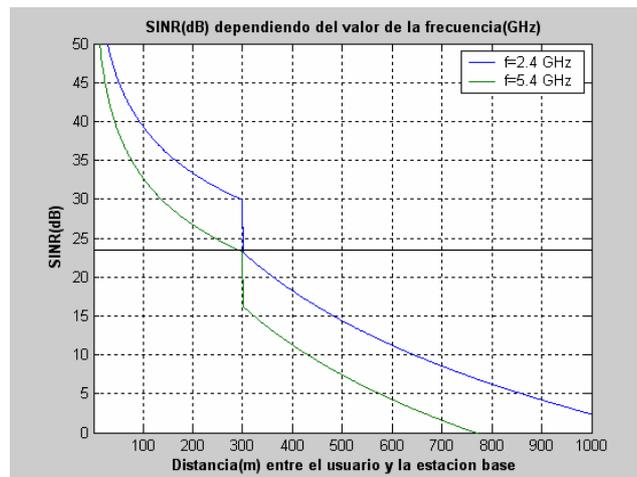


Figura 4-26: SINR dependiendo del valor de la frecuencia

Como se puede ver en la gráfica, un aumento de la frecuencia disminuye el valor del SINR y con ello se produce una disminución en el valor del SINR. Esto es lógico, porque la frecuencia determina el valor de las pérdidas, y al aumentar la frecuencia, aumentan también las pérdidas. Por ello, lo que realmente aumenta al aumentar la frecuencia es el valor del SNR, y por ello, aumenta el SINR. En cambio, el valor del SIR se mantiene constante al variar la frecuencia, ya que aumenta proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia.

Se puede observar como, teniendo como requisito un SINR umbral de 23.5dB, para ambos valores de frecuencia representados, 2.4GHz y 5.4GHz, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros.

En la Figura 4.27, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de la distancia que hay entre las infostation (R es la mitad de la distancia entre las infostation).

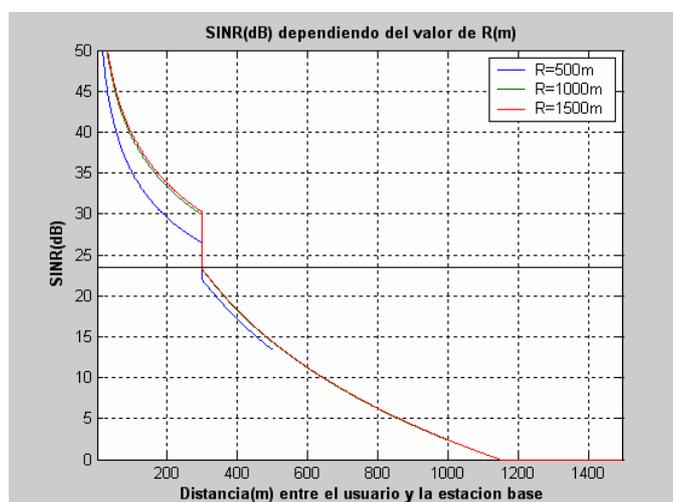


Figura 4-27: SINR dependiendo del valor de R (2R es la distancia entre las infostation)

Se puede observar como, a diferencia del caso de 2 bandas de frecuencia, para los 3 valores de R representados, 500, 1000 y 1500 metros, la distancia a la que puede situarse el usuario de la estación base es la misma en el punto que nos interesa, ya que si fijamos el valor del SINR en 23.5dB, se puede ver como para los 3 casos, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros.

Como conclusión, se tiene que cuando se aumenta la distancia que existe entre las infostation, aumenta el SIR con lo que se produce un aumento en el SINR como se ha visto mediante los valores expuestos anteriormente. Esto es debido a que, para una distancia dada desde el infostation, reduciendo el valor de R se incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo así el valor del SIR lo que produce una disminución en el SINR. En este caso, nos importa un punto determinado en el que para los 3 valores de R coincide la distancia máxima a la que puede situarse el usuario.

En la Figura 4.28, se puede ver como influye la variación de la Potencia de transmisión en el SINR.

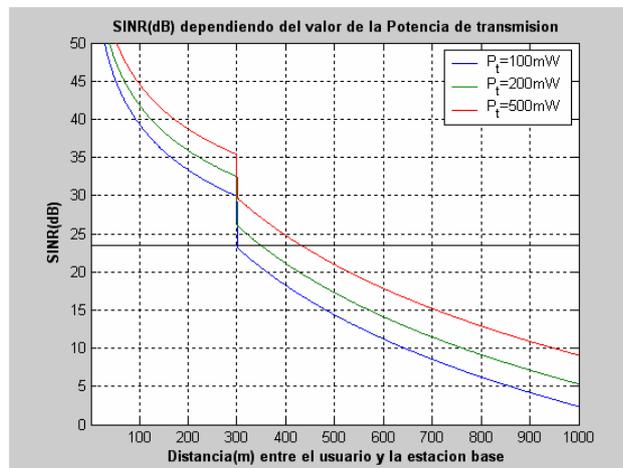


Figura 4-28: SINR dependiendo del valor de la potencia de transmisión

Si nos fijamos en los puntos en los que corta cada una de las curvas con el SINR umbral situado en 23.5dB, se puede ver como para una potencia de transmisión de 100mW se tiene una distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base de 300m. Para una potencia de transmisión de 200mW, esta distancia máxima aumenta a 350m, mientras que para el otro valor de potencia de transmisión de 500mW, la distancia aumenta aún mas situándonos en 430 metros de distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base teniendo un SINR mínimo de 23.5dB.

Como se puede ver en la gráfica anterior, a medida que se aumenta la potencia de transmisión aumenta la Relación Señal a Ruido e Interferencia. Esto es lógico ya que al aumentar la potencia de transmisión se aumenta proporcionalmente la potencia recibida, por lo que se aumenta el SNR (Relación señal a ruido) y con ello se produce un aumento en el SINR. Se debe tener en cuenta de que la Relación señal a interferencia SIR no varía con la variación de la potencia transmitida (las interferencias aumentan o disminuyen proporcionalmente con la potencia de transmisión), por lo que el motivo por el que varía el SINR es únicamente porque al aumentar la potencia de transmisión aumenta la potencia recibida, por lo que el SNR aumenta.

Esto lo se puede ver representando la influencia que tiene la variación de la potencia de transmisión en los parámetros SNR y SIR.

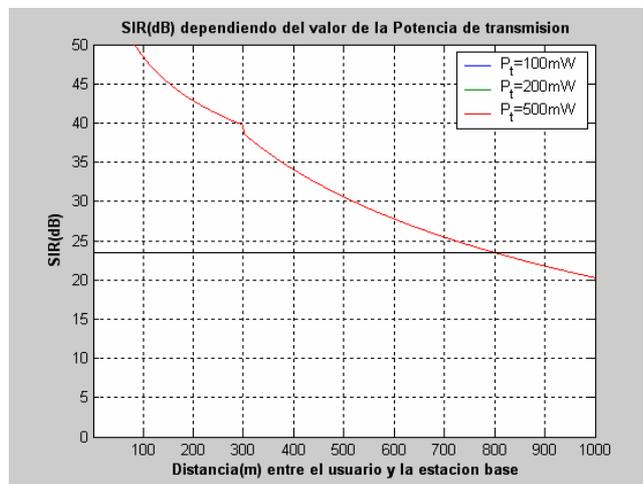


Figura 4-29: SIR dependiendo del valor de la potencia de transmisión

Como se puede ver en la Figura 4.29, el SIR no varía cuando varía la potencia de transmisión. Esto es algo lógico ya que cuando aumenta la potencia de transmisión aumenta de manera proporcional las interferencias, por lo que no influye en la Relación señal a interferencia esta variación.

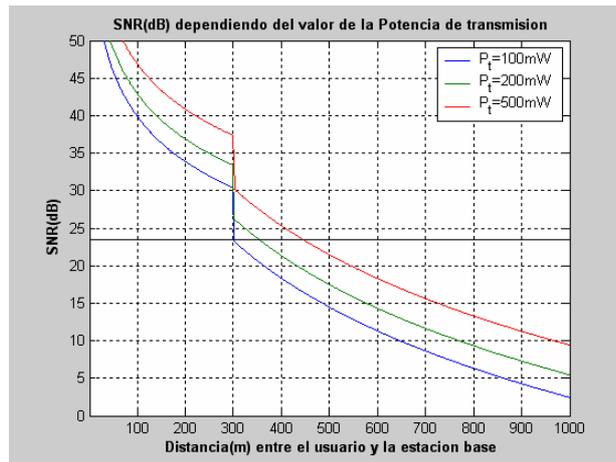
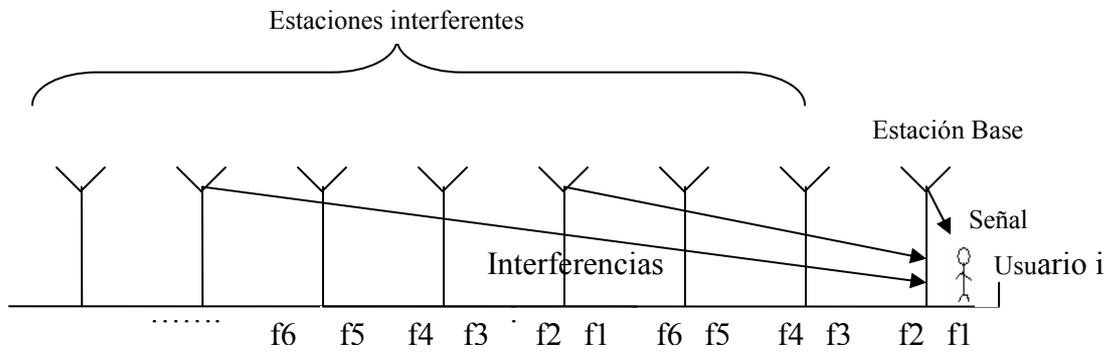


Figura 4-30: SNR dependiendo del valor de la potencia de transmisión

En cambio, como se puede ver en la Figura 4.30, el SNR si que varía enormemente al variar la potencia de transmisión. Esta variación entre la relación de la señal y el ruido es lo que hace que influya la variación de la potencia de transmisión en el SINR.

4.2.3.5 Seis bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros

La situación en la que nos encontramos es la siguiente:



La Figura 4.31, nos muestra como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_1 .

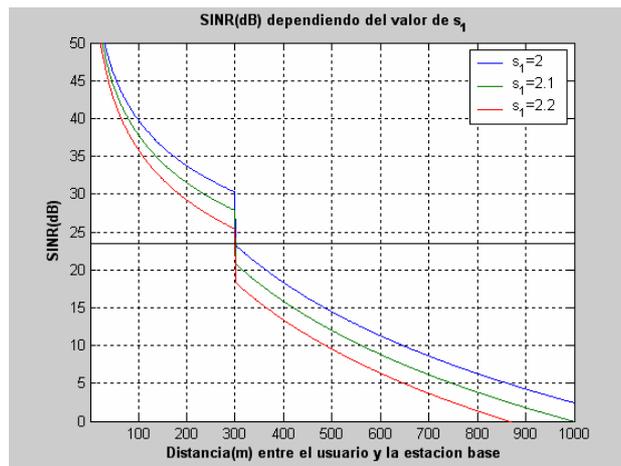


Figura 4-31: SINR dependiendo del valor de s_1

Al igual que pasaba para los 2 casos anteriores de 2 y 4 bandas de frecuencia, sea cual sea el valor del parámetro s_1 , la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros. Además, se puede observar como un valor más bajo de s_1 mejora el SNR por lo que se mejora el SINR.

En la Figura 4.32, se puede ver como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_2 .

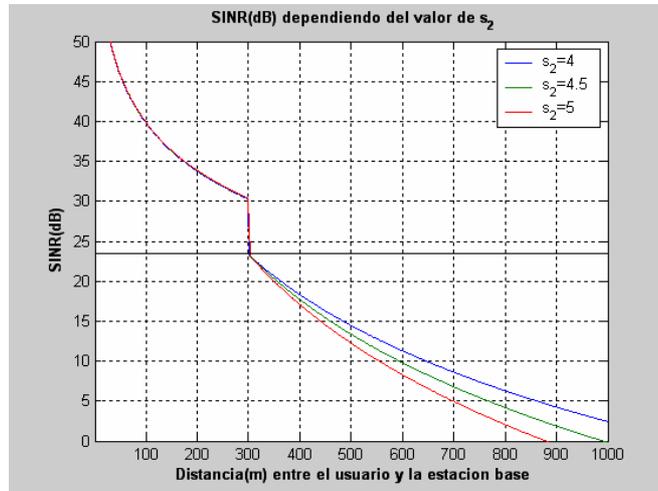


Figura 4-32: SINR dependiendo del valor de s_2

Al igual que en el caso de 4 bandas de frecuencia, para distancias menores a de 300m, no se aprecia influencia en el SINR ante la variación del parámetro s_2 . Si fijamos el SINR a 23.5dB para cumplir el requisito que impusimos, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros, al igual que pasaba en los casos anteriores.

En la Figura 4.33, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de σ_1 .

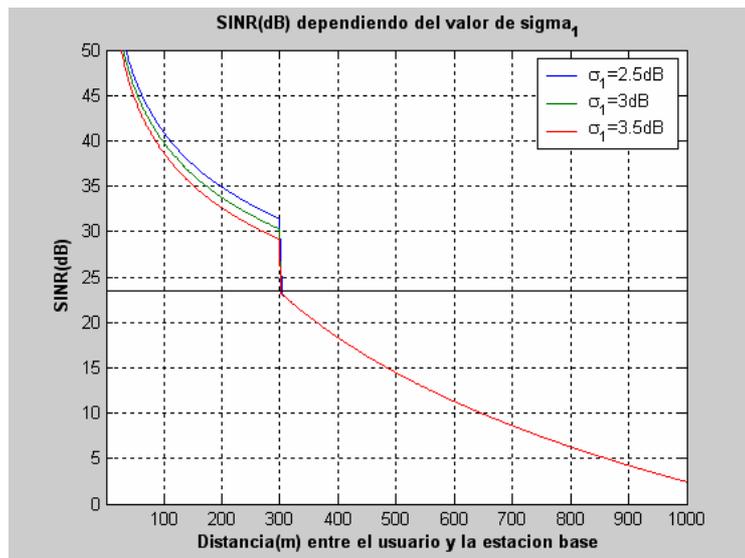


Figura 4-33: SINR dependiendo del valor de σ_1

Como se puede observar, la influencia no varía mucho respecto al caso de 2 bandas de frecuencia. Para valores de distancia entre el usuario y la estación base mayores de 300m, la influencia de la variación del parámetro es nula. Si se quiere tener como mínimo un SINR de

23.5dB, la distancia máxima a la que puede estar el usuario de la estación base será de 300m. En cambio, en el caso de 6 bandas de frecuencia, si se puede observar una influencia mayor para distancias menores a 300m, pero no cambia nada ya que el valor del SINR es de 23.5dB para una distancia de 300m.

En la Figura 4.34, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de σ_2 .

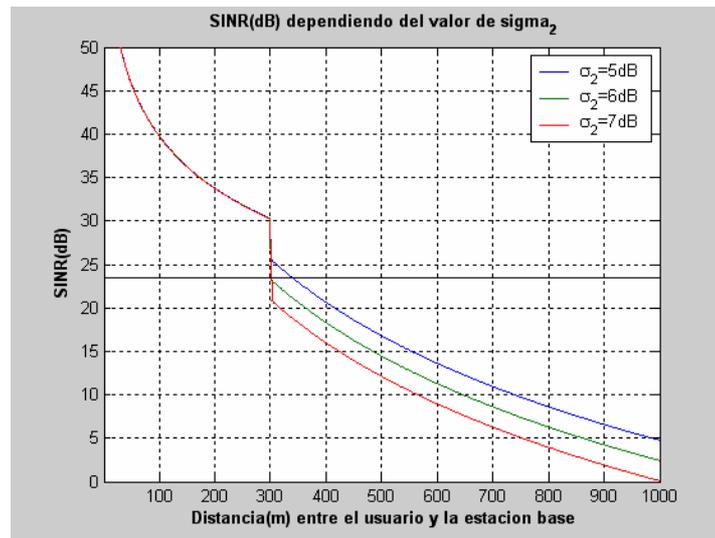


Figura 4-34: SINR dependiendo del valor de σ_2

Al igual que en el caso de 4 bandas de frecuencia, si nos fijamos en las distancias hasta 300m, la influencia de la variación del parámetro σ_2 es nula.

En cambio, a partir de esta distancia, si se puede ver una gran influencia de este parámetro. Si se quiere un SINR de cómo mínimo 23.5dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), para los 2 casos representados del parámetro σ_2 de 6dB y 7dB, la máxima distancia a la que puede situarse el usuario de la estación base será de 300 metros, mientras que para el caso en el que σ_2 es de 5dB, la distancia aumenta a 335m.

Con estos datos, se puede deducir que una disminución de σ_2 , aumenta el SINR notablemente. Esto es debido a que el incremento del valor de σ_2 , incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo de esta manera el SIR y con ello el SINR

Tanto para este caso como para el caso de 4 bandas de frecuencia, el efecto de los parámetros de la primera pendiente (s_1 y σ_1) es mayor para distancias menores de 300m, mientras que los parámetros de la segunda pendiente (s_2 y σ_2) no influyen nada para distancias menores de 300m. En cambio, si nos fijamos en el otro tramo de las gráficas, para distancias mayores de 300m, la influencia de los parámetros de la segunda pendiente es mayor que los de la primera. Por lo que

en este caso, dependiendo del tramo de distancias que estemos observando, la influencia de los parámetros de ambas pendientes varía.

En la Figura 4.35, se puede ver como influye la variación de la correlación de shadowing, determinada por el parámetro C_{do} , en la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias, determinada por el parámetro SINR.

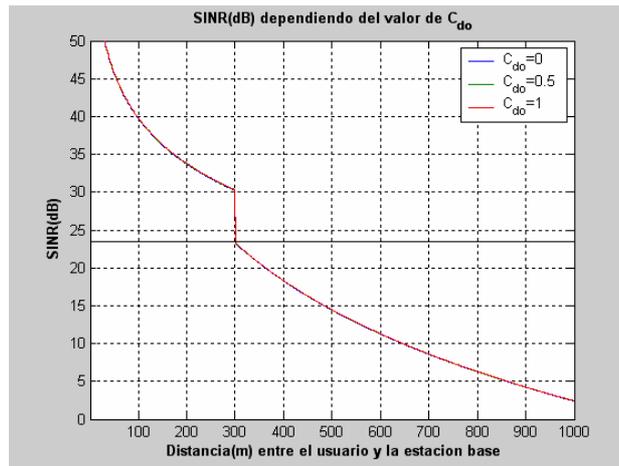


Figura 4-35: SINR dependiendo del valor de la correlación (C_{do})

Como se puede observar en la gráfica, para los 3 valores representados del parámetro C_{do} , la máxima distancia a la que puede situarse el usuario de la estación base teniendo como requisito un SINR umbral de 23.5dB es de 300 metros.

Además, a diferencia de los casos anteriores (sobre todo el de 2 bandas de frecuencia), en el caso de 6 bandas de frecuencia, la variación del factor de correlación C_{do} , no influye en el SINR (para ningún valor de distancia).

Como ya vimos en el caso de 2 bandas de frecuencia, esta variación del SINR se debe únicamente a la variación de las interferencias. Por ello, si existe una influencia en el SIR pero no en el SNR.

Además, se puede ver como en este caso de 6 bandas de frecuencia, la influencia de la variación de la correlación es menor que en el caso de 4 bandas de frecuencia y mucho menor que en el caso de 2 bandas de frecuencia. Esto es debido a que a medida que se aumenta el número de bandas, la potencia de las interferencias disminuye (influye menos), y con ello, pasa a tener más importancia el ruido que las interferencias. Por ello, aunque si nos fijamos en el SIR si tiene una gran influencia la variación de la correlación, al reducirse el valor de la potencia de interferencia,

esta variación deja de ser determinante a la hora de analizar el SINR, siendo más influyente el SNR.

En la Figura 4.36, se puede ver como influye en el SINR la variación de la frecuencia.

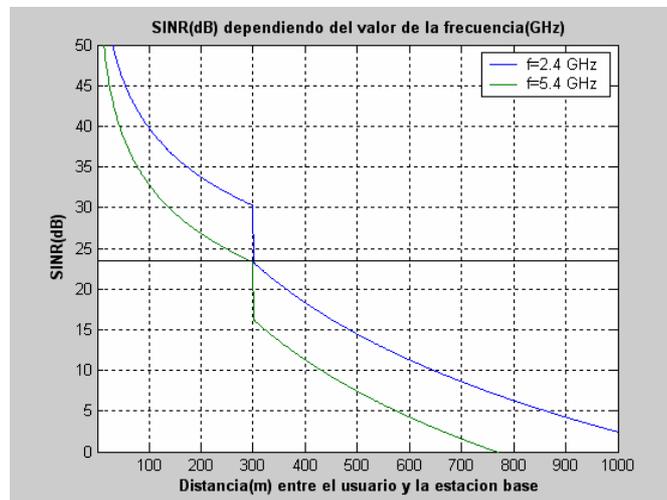


Figura 4-36: SINR dependiendo del valor de la frecuencia

Como se puede ver en la gráfica, un aumento de la frecuencia disminuye la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias. Esto es lógico, porque como ya dijimos en los dos casos anteriores, la frecuencia determina el valor de las pérdidas, y al aumentar la frecuencia, aumentan también las pérdidas. Por ello, lo que realmente disminuye al aumentar la frecuencia es el valor del SNR, y por ello, disminuye el SINR. En cambio, el valor del SIR se mantiene constante al variar la frecuencia, ya que aumenta proporcionalmente la Potencia recibida y la Potencia de interferencia.

Se puede observar como, para un valor umbral del SINR de 23.5dB, tanto para una frecuencia de 2.4GHz como de 5.4GHz, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 300 metros.

En la Figura 4.37, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de la distancia que hay entre las infostation (R es la mitad de la distancia entre las infostation).

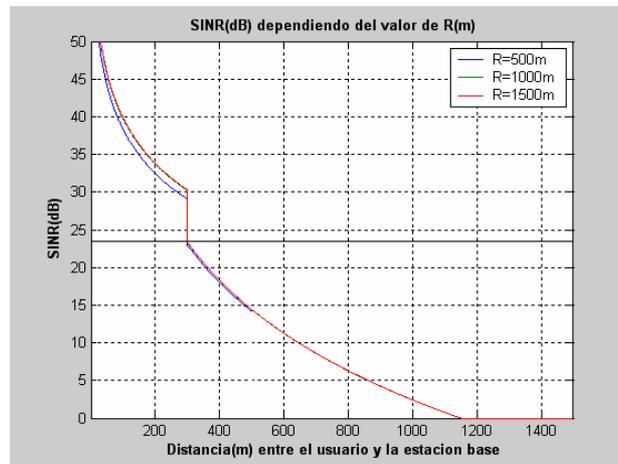


Figura 4-37: SINR dependiendo del valor de R (2R es la distancia entre las infostation)

Se puede observar que la influencia varía también dependiendo de la distancia que haya entre el usuario y la estación base, aunque en este caso es mucho menor, ya que al utilizar 6 bandas de frecuencia, la distancia entre las infostation pasa a ser un parámetro que no es muy determinante.

Para distancias menores de 300m, se puede ver que se produce una influencia mayor aunque muy pequeña; se puede ver que para un R tanto de 1000 como de 1500 metros, la variación es nula, en cambio, para un R de 500m, si se observa un pequeño descenso del SINR, de aproximadamente 1dB.

Si obsérvese va el otro tramo de la gráfica, para distancias entre el usuario y la estación base mayores de 300m, se puede ver que la variación de R, tiene una influencia nula en el SINR, manteniéndose en por ejemplo, para un SINR de 23.5dB en una distancia de 300m, para cualquier valor de R.

Como conclusión, se tiene que cuando se aumenta la distancia que existen entre las infostation, se aumenta el SIR (manteniéndose constante el SNR) lo que conlleva a un aumento del SINR como se ha expuesto anteriormente. Esto es debido a que, para una distancia dada desde el infostation, reduciendo el valor de R se incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo así el valor del SIR, por lo que también se produce una reducción del SINR.

En la Figura 4.38, se puede ver como influye la variación de la potencia de transmisión en el SINR.

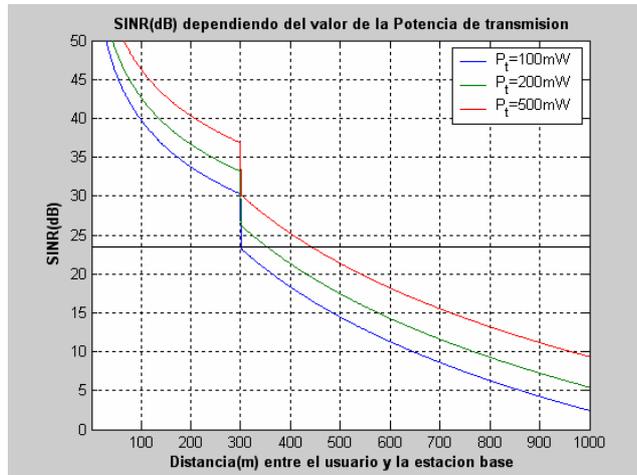


Figura 4-38: SINR dependiendo del valor de la potencia de transmisión

Si nos fijamos en los puntos en los que corta cada una de las curvas con el SINR umbral situado en 23.5dB, se puede ver como para una potencia de transmisión de 100mW se tiene una distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base de 300m. Para una potencia de transmisión de 200mW, esta distancia máxima aumenta a 353m, mientras que para el otro valor de potencia de transmisión de 500mW, la distancia aumenta aún mas situándonos en 442 metros de distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base teniendo un SINR mínimo de 23.5dB.

Como se puede ver en la gráfica anterior, a medida que se aumenta la potencia de transmisión aumenta la Relación Señal a Ruido e Interferencia. Esto es lógico ya que al aumentar la potencia de transmisión se aumenta proporcionalmente la potencia recibida, por lo que se aumenta el SNR (Relación señal a ruido) y con ello se produce un aumento en el SINR. Se debe tener en cuenta de que la Relación señal a interferencia SIR no varía con la variación de la potencia transmitida (las interferencias aumentan o disminuyen proporcionalmente con la potencia de transmisión), por lo que el motivo por el que varía el SINR es únicamente producido por la variación del SNR.

A su vez, como ya dijimos en el apartado de 2 bandas de frecuencia, la potencia de transmisión influye de una manera mayor en el caso de 4 y 6 bandas de frecuencia que en el caso de 2 bandas de frecuencia. Esto es debido a que, en el caso de 2 bandas de frecuencia, la interferencia es mayor que en los otros casos, en cambio, para el caso de 6 bandas de frecuencia la interferencia es menor por lo que se nota más la influencia del ruido. Con ello, en el caso de 6 bandas de frecuencia, el SNR tiene una influencia mayor y por ello, la variación de la potencia de transmisión tiene mayor influencia en el SINR cuando se aumenta el número de bandas.

4.3 Conclusiones de Infostations

La primera conclusión que se puede sacar acerca de la cobertura de Infostation, es la influencia que tiene la distancia en el SINR. Como se ha podido ver, un aumento de la distancia produce una disminución en la Relación Señal a Ruido “SNR”, lo que conlleva a una disminución en la Relación Señal a Ruido e interferencia “SINR”.

Esto lo se puede ver en la Figura 4.5, como a medida que se aumenta la distancia que hay entre el usuario y la estación base, se reduce el SINR. En dicha figura se puede ver como para los 3 casos (2, 4 y 6 bandas de frecuencia), la máxima distancia a la que puede situarse el usuario de la estación base para cumplir el requisito de tener un SINR umbral de 23.5 dB es de 300 metros. Con ello, se puede ver que Infostation tiene cobertura discontinua, ya que no toda la distancia entre dos infostation contiguas esta cubierta.

La elección de uno de los 3 casos a la hora de realizar una implementación práctica será un compromiso entre la calidad y precisión que se requiera y el presupuesto que se tenga. Hay que tener en cuenta, que al aumentar el número de bandas, aumenta la cantidad de espectro de frecuencia que se tiene que comprar para obtener la licencia de uso, por lo que el coste aumenta.

También se ha realizado un estudio de la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base para cada orden de modulación. Para 2 bandas de frecuencia, a una distancia de 300 metros se reduce el orden de modulación a 0, por lo que a partir de esta distancia no se puede dar ningún servicio a los usuarios. Para 4 y 6 bandas de frecuencia ocurre lo mismo, y a partir de dicha distancia el orden de modulación es 0, por lo que de la misma manera no se podrá dar ningún servicio a los usuarios. En los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia se puede dar cualquiera de los servicios hasta una distancia de 300 metros, en cambio, para el caso de 2 bandas de frecuencia, el servicio determinado por el orden de modulación 4 únicamente se puede dar hasta una distancia de 263 metros.

Además, se ha realizado un estudio para cada uno de los casos de cómo influye la variación de cada uno de los parámetros en el SINR.

Un aumento en el parámetro s_1 , hace que disminuya el SNR, lo que produce una disminución en el SINR. Esto es debido a que una variación del parámetro s_1 produce una variación de la potencia recibida, pero no varía la potencia del ruido, por lo que se produce una variación en el SNR. De la misma manera, la variación de este parámetro varía proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia, por lo que no se produce una variación en el SIR.

El parámetro s_2 tiene una variación un poco más compleja. En el primer tramo de distancias, el SINR aumenta cuando aumenta s_2 . Esto es debido a que en este tramo se produce un mejor aislamiento por lo que se reduce las interferencias, por lo que un aumento de s_2 produce un aumento en el SIR lo que conlleva a un aumento en el SINR. En cambio, en el segundo tramo de distancias, aumentan las pérdidas por distancia, por lo que un aumento del s_2 produce una disminución en el SINR. Esto es debido a que un aumento del parámetro s_2 produce una disminución en el SNR (ya que se produce un aumento en las pérdidas), por lo que a su vez se produce una disminución en el SINR.

Si nos fijamos en la variación del parámetro σ_1 tiene una influencia prácticamente nula en el SINR en cualquiera de los casos estudiados. Esto es debido a que a partir de una distancia igual al punto de corte R_b , el parámetro σ_1 no influye en los cálculos, por lo que su variación no influye en el SINR.

En cambio, σ_2 si que influye en el SINR, ya que un aumento de σ_2 produce un aumento del valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo el SIR se reduce y de la misma manera se produce un descenso en el SINR.

A su vez, se puede determinar que la variación de los parámetros de la primera pendiente (s_1, σ_1) tiene una menor influencia que la variación de los parámetros de la segunda pendiente (s_2, σ_2).

La correlación esta determinada por el parámetro C_{do} . Como se ha visto en las gráficas que mostraban la influencia de la variación de este parámetro, un aumento del mismo produce un aumento en el SINR. Esto es debido a que un aumento del C_{do} produce una disminución en el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que aumenta el SIR y con él el SINR.

Un aumento de la frecuencia produce un aumento de las pérdidas. Por este motivo, la variación de la frecuencia si tiene una influencia en el SNR, que debido a que al aumentar la frecuencia se produce un aumento de las pérdidas, se reduce en valor del SNR y por ello también se reduce el valor del SINR. En cambio, la variación de la frecuencia no influye en el SIR, ya que tanto la potencia Recibida como las interferencias varía de la misma manera ante el cambio de la frecuencia, por lo que la relación entre ambas se mantiene constante.

Además, hay que tener en cuenta que se ha mantenido constante el valor de la distancia del punto de ruptura R_b . Esto conlleva a que para cada frecuencia que se utilice se tendrá que poner

diferentes antenas para cada una de ellas a diferentes alturas. Esto lo se puede ver mediante la siguiente fórmula:

$$R_b \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda}$$

Si se varía la frecuencia (que supone una variación de λ), si se mantiene la distancia al punto de ruptura constante, y la altura a la que se sitúa el móvil es siempre la misma (se puede considerarla de 1 metro), se tiene que variar la altura a la que pondremos la antena. Por ejemplo, para el caso de 2.4GHz, se tiene que la altura de la antena sería de unos 9 metros y medio, y para el caso de 5.4GHz sería de unos 5 metros. Hay casos en los que esta altura es demasiado pequeña, por lo que otra opción que se tiene es dejar fija la altura a la que se sitúa la antena, por ejemplo en 10 metros (altura ideal en el caso de microceldas), y lo que se varía es el punto de ruptura para cada valor de la frecuencia. En este caso, para una frecuencia de 2.4GHz, nos valdría un R_b de 300 metros, mientras que para el caso de 5.4GHz, se tendría que fijar el R_b a unos 720 metros, para situar la antena de ambas frecuencias a una altura de 10 metros.

Otro parámetro que se ha variado es la distancia que existe entre dos Infostation contiguas. Al aumentar la distancia que existe entre dos estaciones, se produce un aumento del SIR, ya que la potencia recibida se mantiene constante, en cambio las interferencias disminuyen, por lo que una relación entre ambas que es el SIR aumenta. Este aumento del SIR es lo que produce un aumento en el SINR ante un aumento de R. De la misma manera, la potencia de Ruido se mantiene constante ante una variación de la frecuencia, al igual que la potencia recibida, por lo que el SNR que es la relación entre ambas se mantiene constante.

Además, se puede ver como a medida que se aumenta el número de bandas de frecuencia, la influencia de la variación de R disminuye, ya que a medida que se aumenta el número de bandas, se reduce el valor de las interferencias, por lo que el deja de tener tanta influencia el SIR, y no se produce una influencia grande al variar la distancia que hay entre las estaciones.

Por último, se ha realizado un estudio de cómo influye la variación en el SINR de la potencia transmitida. Como es lógico, un aumento de la potencia transmitida varía el SNR, ya que la potencia de ruido se mantiene constante mientras que la potencia recibida aumenta, lo que produce un aumento de la potencia recibida cuando aumenta la potencia transmitida. En cambio, la variación de la potencia transmitida no influye en el SIR, ya que esta variación influye tanto en la potencia recibida como en la potencia de las interferencias, por lo que la relación entre ambas se mantiene constante. Por ello, se dedujo que un aumento en la potencia transmitida, aumenta la

potencia recibida y el valor de las interferencias, por lo que se produce un aumento en el SNR lo que produce un aumento en el SINR, mientras que el SIR se mantiene constante.

Además, es importante saber que en Infostation no es tan importante el coste de la implementación atendiendo al número de bandas de frecuencia, ya que las frecuencias que se utilizan 2.4GHz y 5.4GHz son espectros de frecuencias libres, por lo que no habría que comprarlas. El único problema respecto a esto, es que las operadoras móviles tendrían que ponerse de acuerdo en el reparto del espectro, asignando a cada una de ellas un número determinado de bandas de frecuencia.

Con todo ello, la conclusión final que sacamos del estudio de la cobertura de Infostation es que para todos los parámetros estudiados, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base si requiere un SINR umbral de 23.5 dB es de 300 metros. Únicamente para la potencia de transmisión varía la distancia máxima a la que puede situarse el usuario para este SINR. Como ya dijimos antes, la cobertura de Infostation es discontinua, ya que no se da cobertura en todo el rango del sector con los requisitos estipulados, siendo el rango de cobertura de 300 metros para un SINR de 23.5dB.

5 Sistemas WiMAX en autopistas

En este capítulo se va a analizar el sistema de comunicaciones móviles WiMAX. Después de una breve introducción acerca de esta tecnología y los conceptos claves necesarios para la comprensión del posterior análisis, se va a definir el modelo de propagación y se va a realizar un profundo estudio teórico de la cobertura de WiMAX, sacando conclusiones reales a partir del análisis teórico.

5.1 Introducción de WiMAX

WiMAX son las siglas de Worldwide Interoperability for Microwave Access (interoperabilidad mundial para acceso por microondas). Es una norma de transmisión de datos usando ondas de radio.

Es una tecnología dentro de las conocidas como tecnologías de última milla, que permite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio. El protocolo que caracteriza esta tecnología es el IEEE 802.16. Una de sus ventajas es dar servicios de banda ancha en zonas donde el despliegue de cable o fibra por la baja densidad de población presenta unos costos por usuario muy elevados (zonas rurales).

El único organismo habilitado para certificar el cumplimiento del estándar y la interoperabilidad entre equipamiento de distintos fabricantes es el Wimax Forum: todo equipamiento que no cuente con esta certificación, no puede garantizar su interoperabilidad con otros productos.

Los perfiles del equipamiento que existen actualmente en el mercado; compatibles con WiMAX, son exclusivamente para las frecuencias de 2,5 y 3,5 Ghz como puede comprobarse en la base de datos de WiMax Forum.

Existe otro tipo de equipamiento (no estándar) que utiliza frecuencia libre de licencia de 5,4 Ghz, todos ellos para acceso fijo. Si bien en este caso se trata de equipamiento que no es inter-operativo, entre distintos fabricantes (Pre Wimax, incluso 802.11a). Existen planes para desarrollar perfiles de certificación y de interoperabilidad para equipos que cumplan el estándar IEEE 802.16e (lo que posibilitará movilidad), así como una solución completa para la estructura de red que

integre tanto el acceso fijo como el móvil. Se prevé el desarrollo de perfiles para entorno móvil en las frecuencias con licencia en 2,3 y 2,5 Ghz.

Actualmente se recogen dentro del estándar 802.16, existen dos variantes:

- **Uno de acceso fijo (802.16d):** en este estándar se establece un enlace radio entre la estación base y un equipo de usuario situado en el domicilio del usuario, Para el entorno fijo, las velocidades teóricas máximas que se pueden obtener son de 70 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz. Sin embargo, en entornos reales se han conseguido velocidades de 20 Mbps con radios de célula de hasta 6 Km, ancho de banda que es compartido por todos los usuarios de la célula.
- **Otro de movilidad completa (802.16e):** este permite el desplazamiento del usuario de un modo similar al que se puede dar en GSM/UMTS, el móvil, aun no se encuentra desarrollado y actualmente compite con las tecnologías LTE, (basadas en femtocélulas, conectadas mediante cable), por ser la alternativa para las operadoras de telecomunicaciones que apuestan por los servicios en movilidad, este estándar, en su variante "no licenciado", compite con el WiFi IEEE 802.11n, ya que la mayoría de los portátiles y dispositivos móviles, empiezan a estar dotados de este tipo de conectividad (principalmente de la firma Intel).

La amplia cobertura de esta tecnología teóricamente llegaría a una distancia de hasta 50 Km con antenas muy direccionales y de alta ganancia, en la práctica en un entorno NLOS hasta 10 Km., y es capaz de alcanzar velocidades de hasta 75 Mbps, ya que los estándares de acceso inalámbrico 'IEEE 802.16', permiten conexiones de velocidades similares al ADSL o al cable-módem, sin cables. Gracias a las características de WiMAX, esta tecnología permite extender la cobertura de los sistemas inalámbricos actuales, pudiendo por ejemplo llevar el acceso a áreas de baja densidad de población actualmente marginadas por factores económicos. WiMAX puede integrarse con otro tipo de tecnologías en auge como puede ser la comunicación de voz basada en el protocolo de Internet o IP y algunas de sus normas se han diseñado para poder dar servicio a usuarios en movimiento, dando así un mayor empuje al concepto de movilidad.

5.1.1 Especificaciones

	802.16	802.16 ^a	802.16e
Espectro	10 - 66 GHz	< 11 GHz	< 6 GHz
Funcionamiento	Solo con visión directa	Sin visión directa (NLOS)	Sin visión directa (NLOS)
Tasa de bit	32 - 134 Mbit/s con canales de 28 MHz	Hasta 75 Mbit/s con canales de 20 MHz	Hasta 15 Mbit/s con canales de 5 MHz
Modulación	QPSK, 16QAM y 64 QAM	OFDM con 256 subportadoras QPSK, 16QAM, 64QAM	Igual que 802.16 ^a
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
Anchos de banda	20, 25 y 28 MHz	Seleccionables entre 1,25 y 20 MHz	Igual que 802.16 ^a con los canales de subida para ahorrar potencia
Radio de celda típico	2 - 5 Km. aprox.	5 - 10 Km. aprox. (alcance máximo de unos 50 Km.)	2 - 5 Km. aprox.

Tabla 5-1. Especificaciones de WiMAX

Además, se han elaborado algunos estándares adicionales basados en el 802.16^a para incorporar detalles técnicos por parte de WiMAX Forum, por ejemplo el 802.16c se realizó para dar soporte a las bandas de 10 – 66 GHz.

5.1.2 Características Principales

- Anchos de canal entre 1,5 y 20 MHz
- Utiliza modulaciones OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) con 256 y 2048 portadoras respectivamente, que permiten altas velocidades de transferencia incluso en condiciones poco favorables. Esta técnica de modulación es la que también se emplea para la televisión digital, sobre cable o satélite, así como para Wi-Fi (802.11a) por lo que está suficientemente probada
- Incorpora soporte para tecnologías “smart antenas” que mejoran la eficiencia y la cobertura. Estas antenas son propias de las redes celulares de 3G, mejorando la red espectral, llegando así a conseguir el doble que 802.11

- Incluye mecanismos de modulación adaptativa, mediante los cuales la estación base y el equipo de usuario se conectan utilizando la mejor de las modulaciones posibles, en función de las características del enlace radio.
- Soporta varios cientos de usuarios por canal, con un gran ancho de banda y es adecuada tanto para tráfico continuo como a ráfagas, siendo independiente de protocolo; así, transporta IP, Ethernet, ATM etc. y soporta múltiples servicios simultáneamente ofreciendo Calidad de Servicio (QoS) en 802.16e, por lo cual resulta adecuado para voz sobre IP (VoIP), datos y vídeo.
- También, se contempla la posibilidad de formar redes malladas (mesh networks) para que los distintos usuarios se puedan comunicar entre sí, sin necesidad de tener visión directa entre ellos.
- En la seguridad tiene medidas de autenticación de usuarios y la encriptación de datos mediante los algoritmos triple DES y RSA.

5.2 La cobertura en WiMAX

Lo primero que se va a realizar es un análisis del modelo de propagación. El motivo por el que se vuelve a repetir este apartado, es que se quiere realizar un análisis de cada una de las tecnologías por separado, atendiendo a una posible demanda de alguno de los capítulos de forma independiente.

5.2.1 El Modelo de Propagación

Para calcular las pérdidas de propagación en autopistas, usando WiMAX, usaremos un modelo de propagación sobre la tierra plana en el que están presentes dos exponentes de propagación diferentes para dos tramos, como se puede ver en la Figura 5.1, en los cuales, para cada uno de los tramos, se dará el valor medio de pérdidas de propagación más el efecto de shadowing que se presenta por una distribución Log-normal.

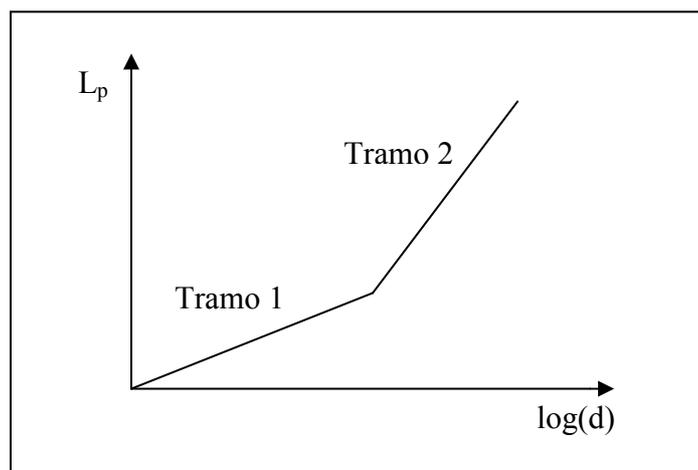


Figura 5-1: Modelo basado en la propagación sobre la tierra plana. Dos tramos, cada uno con un exponente de propagación

Se asume que el exponente de las pérdidas de propagación es s_1 hasta el punto de ruptura (a una distancia R_b), y a partir de él, el exponente de propagación cambia a un valor mayor determinado por s_2 .

Por ello, las pérdidas de propagación entre una estación WiMAX y un usuario móvil vienen dadas por [1]:

$$\begin{cases} L_p (dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \xi_1, & \text{si } r \leq R_b \\ L_p (dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \xi_2, & \text{si } r > R_b \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} L_p (dB) \approx L_b + 10s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \xi_1, & \text{si } r \leq R_b \\ L_p (dB) \approx L_b + 10s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \xi_2, & \text{si } r > R_b \end{cases} \quad (5.2)$$

Donde:

- L_g , son las pérdidas de penetración por las ventanas de los automóviles (son cero si el usuario esta fuera del coche)
- r , es la distancia entre la estación base y el usuario móvil
- ξ_1 y ξ_2 , son dos variables aleatorias con media cero y desviación estándar σ_1 y σ_2 respectivamente, y representa el efecto del shadowing
- L_b , pérdidas básicas de propagación, vienen dadas por:

$$L_b (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) + 10s_1 \log_{10} (R_b) \quad (5.3)$$

- R_b , distancia del punto de corte, viene dado por:

$$R_b \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda} \quad (5.4)$$

Donde,

- h_b es la altura de la antena de la estación base en metros
- h_m es la altura de la antena a la que coloca el móvil el usuario
- λ es la longitud de onda dada en metros

De las anteriores ecuaciones nos se da cuenta que las perdidas básicas L_b son función de la frecuencia y de la distancia al punto de corte R_b . Teniendo esto en cuenta, las pérdidas de propagación L_p son también función de la frecuencia y de la distancia al punto de corte R_b , al igual que pasará con la potencia recibida y las señales de interferencia.

Los valores típicos de los mencionados parámetros son:

$$s_1 = 2 \text{ a } 2.2$$

$$s_2 = 4 \text{ a } 5$$

$$\sigma_1 = 2.5 \text{ a } 3.5 \text{ dB}$$

$$\sigma_2 = 5 \text{ a } 7 \text{ dB}$$

$$R_b = 300 \text{ m}$$

$$L_g = 3 \text{ dB}$$

5.2.2 Análisis de la cobertura del enlace descendente

Usando el modelo de propagación de dos pendientes mencionado en el apartado anterior, se va a calcular los estadísticos de interferencia [2] (valor medio y varianza) para encontrar la cobertura de WiMAX.

La Figura 5.2, muestra la configuración de las 8 estaciones WiMAX con celdas en forma de cigarro que se tiene en cuenta en el análisis. Por su parte, la Figura 4.3 muestra el diagrama de radiación de las dos antenas utilizadas en cada estación. Se asume que las estaciones estarán espaciadas regularmente a una distancia $2R$. El rendimiento de las estaciones WiMAX será estudiada considerando el sector derecho de la estación C1.

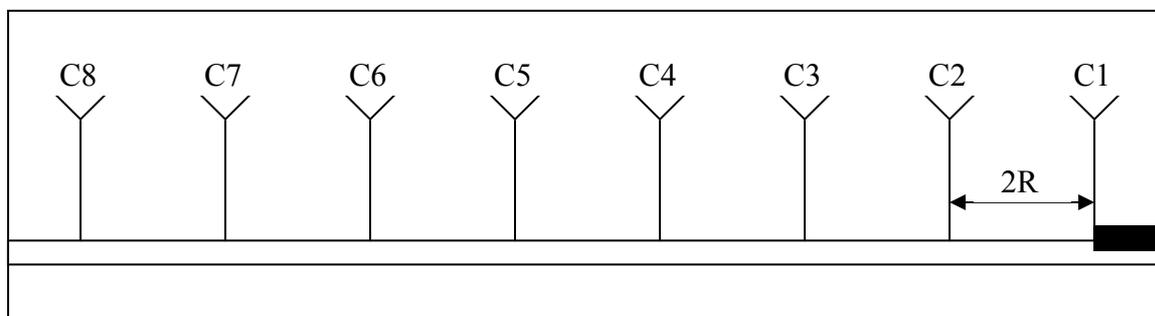


Figura 5-2: Modelo de WiMAX de 8 celdas en forma de cigarro

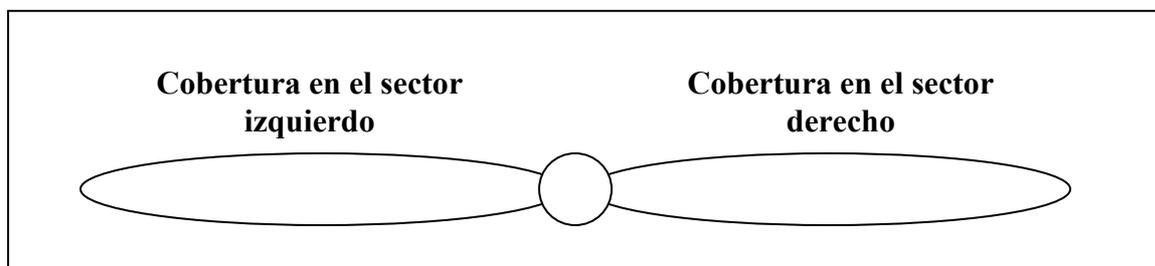


Figura 5-3: Diagrama horizontal de radiación de las dos antenas direccionales usadas en cada estación WiMAX

El usuario i está a una distancia r_{id} de la estación bajo estudio ($C1$) y a una distancia r_{io} de la estación interferente, como se ve en la Figura 5.4.

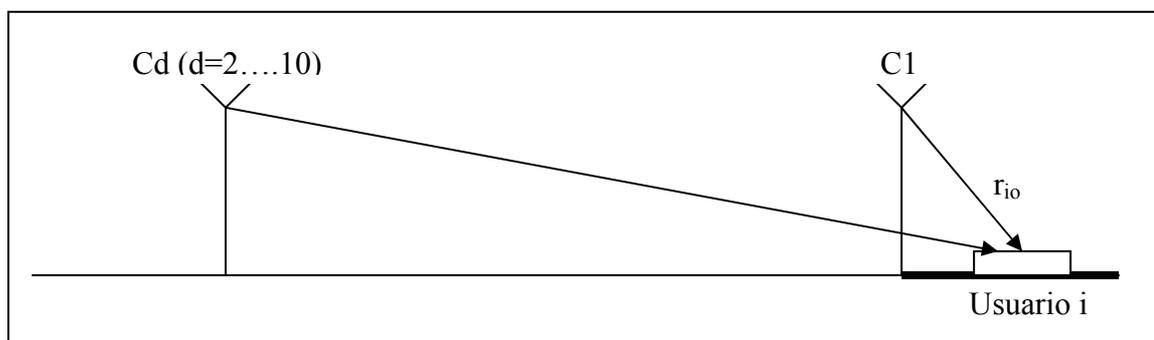


Figura 5-4: Diagrama esquemático del escenario de WiMAX con un usuario móvil en celdas de autopistas

Con todo ello, la interferencia normalizada $L(r_{id}, r_{io})$ debida únicamente a la distancia viene dada por las siguientes fórmulas (dependiendo del valor de estas distancias respecto a R_b):

- Si r_{id} y $r_{io} \leq R_b$ (caso no práctico):

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (5.5)$$

- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{io} \leq R_b$:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{R_b} \right)^{s_1} \left(\frac{R_b}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (5.6)$$

- Si r_{id} y $r_{io} > R_b$:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (5.7)$$

Estos cálculos tienen solo en cuenta la distancia; si se quiere calcular la señal de interferencia $I(r_{id}, r_{io})$ debido a la distancia y al shadowing, se deberá usar la siguiente fórmula:

$$I(r_{id}, r_{io}) = 10^{(\xi_{id} - \xi_{io})/10} L(r_{id}, r_{io}) \quad (5.8)$$

Siendo,

- Si r_{id} y $r_{io} \leq R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_1$ y $\xi_{io} = \xi_1$
- Si $r_{id} > R_b$, pero $r_{io} \leq R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{io} = \xi_1$
- Si r_{id} y $r_{io} > R_b$, entonces $\xi_{id} = \xi_2$ y $\xi_{io} = \xi_2$

La potencia recibida de la señal deseada viene dada por:

$$P_r = P_t 10^{-(L_{or}(dB) - G_{tx}(dB) - G_{rx}(dB))/10} \quad (5.9)$$

Donde,

- P_t , es la potencia transmitida por las estaciones en cada una de las dos direcciones.
- L_{or} , es la pérdida (medida en dB) debida a la distancia “r” que existe entre la estación bajo estudio y el usuario.
- G_{tx} , es la ganancia de la antena de la estación base medida en dB
- G_{rx} , es la ganancia de la antena móvil que se asume que es 0 dB.

La ecuación anterior puede reescribirse como:

$$P_r = k P_t \quad (5.10)$$

Donde k es,

$$k = 10^{-(L_{or}(dB) - G_{tx}(dB) - G_{rx}(dB))/10} \quad (5.11)$$

En L_{or} , el efecto tanto de la distancia como del shadowing está incluido. Para una disponibilidad “ α ” dada, L_{or} viene dada por:

$$\begin{cases} L_{or}(dB) = L_b + 10 s_1 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + L_g + \sigma_1 Q^{-1}(\alpha), & \text{if } r \leq R_b \\ L_{or}(dB) = L_b + 10 s_2 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + L_g + \sigma_2 Q^{-1}(\alpha), & \text{if } r > R_b \end{cases} \quad (5.12)$$

$$\quad (5.13)$$

Donde $Q^{-1}(\cdot)$ es la inversa de la función Gaussiana Q , definida por la siguiente ecuación:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad (5.14)$$

La función $Q^{-1}(\cdot)$ tiene un valor de 2.05 para una disponibilidad del 98%, y 2.34 para un valor de disponibilidad del 99%.

El valor esperado de la potencia interferente debido a las demás estaciones WiMAX (de la 2 a la 8) viene dado por:

$$E[I] = P_r \sum_{d=2}^8 e^{(\beta^2 \sigma^2 / 2)} L(r_{id}, r_{io}) Q \left[\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma} \right] \quad (5.15)$$

Donde,

- β , tiene un valor de $(\ln 10)/10$
- σ , es la desviación estándar $(\xi_{id} - \xi_{io})$
- Q , es la función Gaussiana definida anteriormente

El valor de σ^2 , viene dado por:

- Cuando r_{id} y $r_{io} \leq R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_1$ y $\sigma_{io} = \sigma_1$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_1^2 \quad (5.16)$$

Donde C_{do} es el coeficiente de correlación debido a los parámetros de shadowing ξ_{id} y ξ_{io}

- Cuando $r_{id} > R_b$ y $r_{io} \leq R_b$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{do}) \sigma_1 \sigma_2 \quad (5.17)$$

- Cuando r_{id} y $r_{io} > R_b$, $\sigma_{id} = \sigma_2$ y $\sigma_{io} = \sigma_2$, el valor de σ^2 viene dado por:

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_2^2 \quad (5.18)$$

La varianza de la potencia interferente viene dada por,

$$\text{var}[I_{\text{inter}}] = P_r^2 \sum_{d=2}^8 e^{2(\beta^2 \sigma^2)} L(r_{id}, r_{io})^2 \left\{ g\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) - f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) \right\} \quad (5.19)$$

Donde,

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[2\beta\sigma + \frac{10 \log_{10}\{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (5.20)$$

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[\beta\sigma + \frac{10 \log_{10}\{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (5.21)$$

Para un valor de disponibilidad “ α ” dado, la relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias o SINR del usuario bajo estudio viene dado por,

$$\text{SINR} = \frac{S}{N + I} = \frac{P_r}{E[I] + P_N + Q^{-1}(\alpha)\sqrt{\text{var}[I]}} \quad (5.22)$$

Donde P_N es el ruido térmico del receptor móvil.

5.2.3 Resultados de la cobertura de WiMAX

Usando los algoritmos y ecuaciones presentados en los apartados anteriores, se va a pasar a describir los resultados numéricos obtenidos para WiMAX.

Para ello, se ha utilizado un código desarrollado mediante Matlab, en el que se define los parámetros según los siguientes valores:

$C_{do} = 0.5$
$s_1 = 2$
$s_2 = 4$
$\sigma_1 = 3 \text{ dB}$
$\sigma_2 = 6 \text{ dB}$
$R_b = 340 \text{ m}$
$R = 1000 \text{ m}$
$\alpha = 0.99$
$P_t = 1 \text{ W}$
$P_N = -100 \text{ dBm}$
$G_{tx} = 10 \text{ dB}$
$G_{rx} = 0 \text{ dB}$
Frecuencia = 2.5GHz

Tabla 5-2. Valor de los parámetros

Como la frecuencia es de 2.5GHz, y teniendo en cuenta la siguiente relación que existe entre el valor de la distancia de punto de corte " R_b " y la frecuencia:

$$R_b \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda}$$

Si se toma una altura del móvil de 1 metro (ya que el usuario está en el interior de un vehículo), y se sitúa la antena de la estación base a una altura de 10 metros, si se considera la frecuencia de 2.5GHz como reflejamos en la tabla anterior, nos sale que el valor de la distancia del punto de corte es de aproximadamente 340m, valor que utilizaremos en los análisis que realicemos.

Por otra parte, dependiendo de los esquemas de modulación que se utilice en WiMAX se pueden considerar diferentes SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia) umbrales, tal y como muestra la siguiente tabla [5]:

Orden	Esquema de modulación	SINR requerido (dB)
1	BPSK 1/2	6.4
2	QPSK 1/2	9.4
3	QPSK 3/4	11.2
4	16 QAM 1/2	16.4
5	16 QAM 3/4	18.2
6	64QAM 1/2	22.7
7	64QAM 3/4	24.4

Tabla 5-3. SINR requerido en función de los esquemas de modulación para WiMAX

En el caso de WiMAX (al igual que pasa con GSM), se tiene que dar una comunicación en todo el rango del sector con un SINR mayor que el umbral que se sitúa en 6.4dB para poder sostener cualquiera de las anteriores modulaciones. Para los casos que esto no ocurra, se considerarán casos impracticables, y no se tendrán en cuenta como posibles implementaciones prácticas y no se hará un análisis más profundo de ello.

5.2.3.1 Influencia del número de bandas de frecuencia en la distancia máxima

Lo primero que se va a hacer es ver la influencia en la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base teniendo como requisito un SINR umbral de 6.4dB, dependiendo del número de bandas con las que se haga el estudio. Utilizaremos los modelos de 2, 4, y 6 bandas de frecuencia.

Para ello, se va a mostrar una gráfica conjunta que muestra el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia) frente a la distancia que hay entre el usuario y la estación base, para cada uno de los casos. En este caso general y en los posteriores, se ha tenido en cuenta las interferencias de las 5 estaciones más cercanas para cada caso.

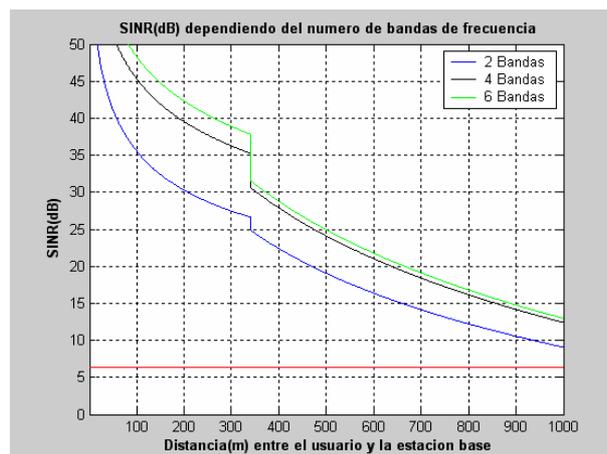


Figura 5-5: SINR dependiendo del número de bandas de frecuencia

Como se puede observar en la Figura 5.5, existe una gran mejoría usando 4 y 6 bandas respecto al uso de únicamente 2 bandas de frecuencia. Poniendo como requisito un SINR umbral de 6.4dB (representado en la Figura 5.5 mediante una línea roja horizontal), se tiene que para los 3 casos estudiados 2, 4 y 6 bandas de frecuencias se puede cubrir toda la distancia que existe entre dos estaciones base de WiMAX con una Relación Señal a Ruido e Interferencia superior a la umbral, por lo que en un primer análisis se puede ver que los 3 casos son posibles.

Otra conclusión que se puede sacar de la gráfica es que, si se compara los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia con el caso de 2 bandas de frecuencia, se tiene una mejoría en el SINR de aproximadamente 4dB, por lo que se tendrá que tener un compromiso calidad/coste a la hora de elegir cual de las implementaciones se debe llevar a cabo en cada situación concreta. Cuantas más bandas de frecuencia se utilice, mayor será el coste de implementación ya que hay que comprar la licencia del espectro de frecuencia, y a mayor número de bandas, mayor será el tamaño del espectro que se tenga que comprar, por lo que mayor será el coste. Por otra parte, como ya se ha visto, a mayor número de bandas de frecuencia mayor es el SINR, por lo que mayor es la calidad de la comunicación, por ello, a la hora de realizar una implementación práctica se tendrá que tener un compromiso calidad/coste.

Si seguimos aumentando el número de bandas, no se produce casi ninguna mejoría, siendo el caso de 8 bandas de frecuencia muy similar al de 6 bandas de frecuencia, por lo que a partir de 6 bandas de frecuencia no se va a entrar más en detalle, ya que los resultados serán prácticamente iguales que en el caso de 6 bandas de frecuencia.

5.2.3.2 Influencia del orden de modulación en la distancia máxima

A continuación, se va a ver de manera gráfica, las distancias máximas a las que se puede dar cada uno de los servicios (determinados por cada una de las modulaciones) para cada caso, tomando como rango del sector 1000 metros.

- 2 bandas de frecuencia

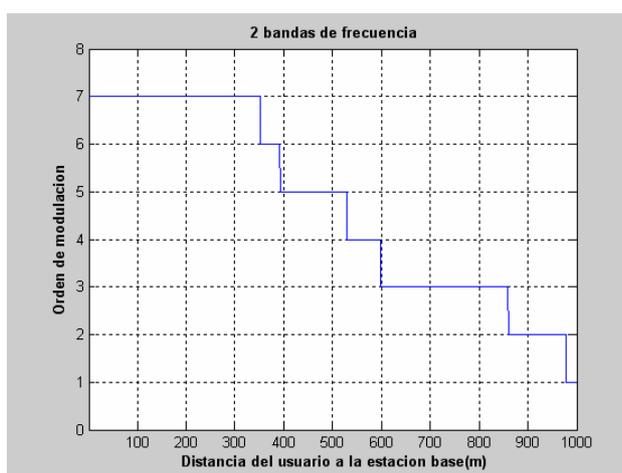


Figura 5-6: Distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base para cada orden de modulación en el caso de 2 bandas de frecuencia

- 4 bandas de frecuencia

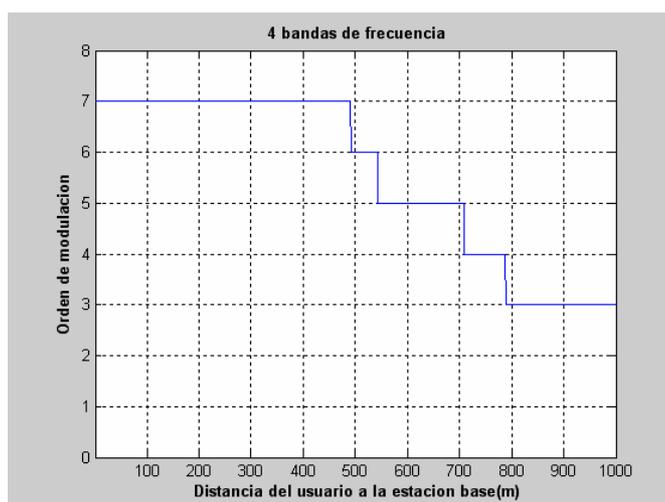


Figura 5-7: Distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base para cada orden de modulación en el caso de 4 bandas de frecuencia

- **6 bandas de frecuencia**

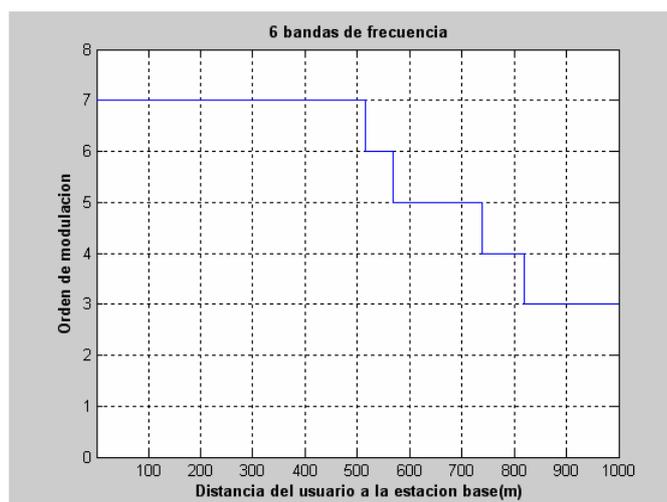


Figura 5-8: Distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base para cada orden de modulación en el caso de 6 bandas de frecuencia

Además, se puede hacer un análisis teniendo en cuenta que el rango del sector puede ser mayor a 1000 metros (cogiendo por ejemplo un rango del sector de 1500 metros).

A continuación, se muestra una gráfica en la que se compara los 3 casos bajo estudio (2, 4 y 6 bandas de frecuencia) en la que se puede ver a partir de que distancia no podremos dar ningún servicio al usuario teniendo como rango del sector teórico 1500 metros:

- **Gráfica conjunta para los 3 casos y un rango del sector de 1500 metros**

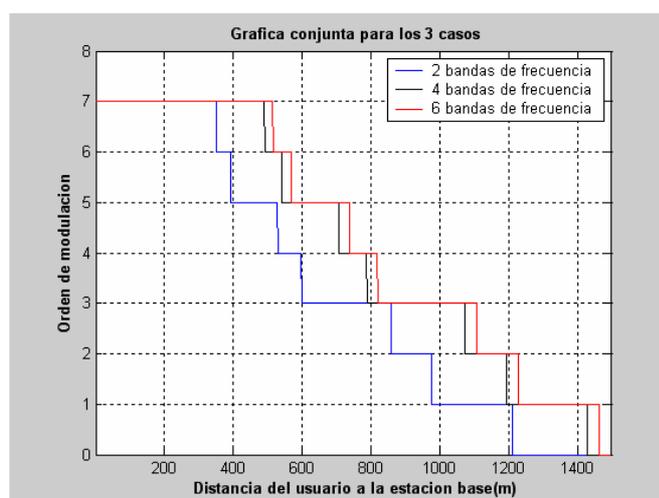


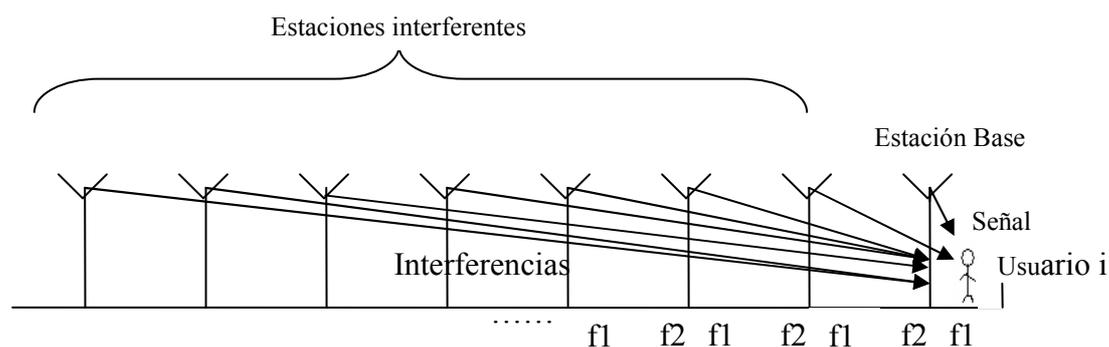
Figura 5-9: Distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base para cada orden de modulación

En esta figura, se puede ver la comparación entre los 3 casos bajo estudio teniendo como radio del sector 1500 metros. Para el caso de 2 bandas de frecuencia, se tiene que la distancia a partir de la cual no se puede dar ningún servicio al usuario sería de 1213 metros, mientras que para los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia esta distancia aumenta hasta 1429 y 1464 metros respectivamente. Por ello, se puede concluir que el radio del sector no puede ser 1500 metros en ningún caso.

A continuación, se va a ver la influencia que tienen los diferentes parámetros en cada uno de los casos posibles: 2, 4 y 6 bandas de frecuencia.

5.2.3.3 Dos bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros

La situación en la que nos encontramos es la siguiente:



La Figura 5.10 nos muestra como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_1 .

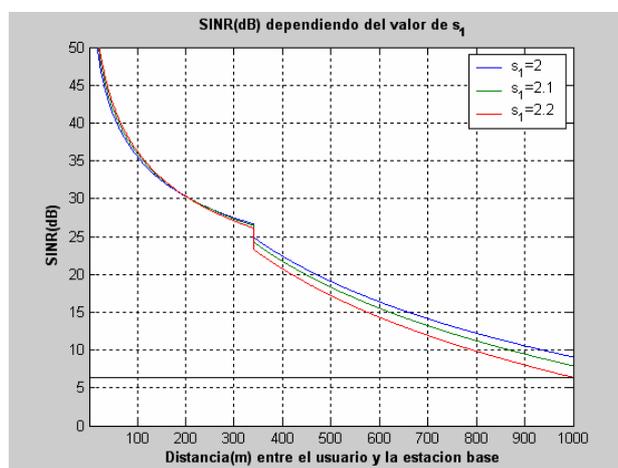


Figura 5-10: SINR dependiendo del valor de s_1

En la Figura 5.10, se puede ver como influye la variación del parámetro s_1 . Como se puede ver, el SINR mejora para un valor más bajo de s_1 . Si se quiere un SINR umbral de 6.4dB, se puede ver que los 3 valores representados de s_1 son posibles, ya que nos dan un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector. Si nos fijamos en el primer tramo de la gráfica, la influencia es al contrario (valores mayores de s_1 dan un SINR mejor). Esto es debido a que influyen diferentes fenómenos en cada tramo; en el primero, existe un mayor aislamiento por lo que las interferencias son menores, mientras que en el segundo aumentan las pérdidas producidas por la distancia, por ello, el SINR mejora para valores más bajos del parámetro s_1 .

En la Figura 5.11 se puede ver como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_2 .

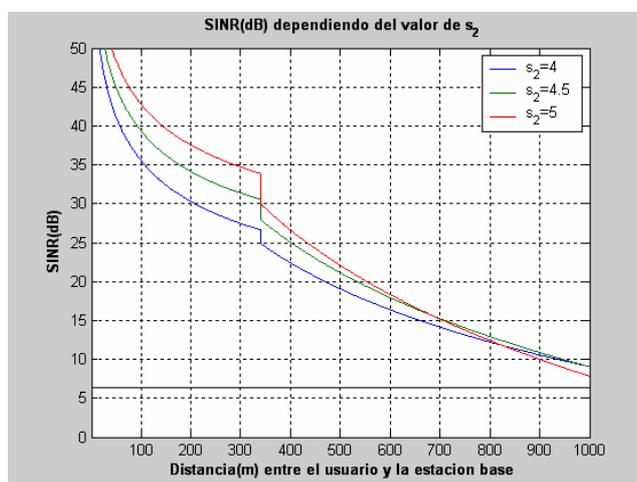


Figura 5-11: SINR dependiendo del valor de s_2

En este caso, se puede ver como dependiendo de la distancia, la influencia del parámetro varía considerablemente. Si nos fijamos en distancias menores a 800 metros, el SINR mejora con valores mayores del parámetro s_2 . A partir de esta distancia, esta influencia cambia, llegando para una distancia límite de 1000 metros, a tener el mejor SINR para el valor más bajo de s_2 .

Como se puede ver en la gráfica, de los valores del parámetro s_2 representados (4, 4.5 y 5), se da cobertura a todo el rango del sector con un SINR mayor que el umbral de 6.4dB para los 3 valores, por lo que los 3 son posibles para dicho parámetro en el caso de 2 bandas de frecuencia.

En el caso de este parámetro, la variación de s_2 influye tanto en el SIR como en el SNR (en este caso la variación se observa únicamente a partir de la distancia R_b). Esto lo se puede ver observando las siguientes figuras, en las que se puede ver como varía tanto el SNR como el SIR al variar el parámetro s_2 :

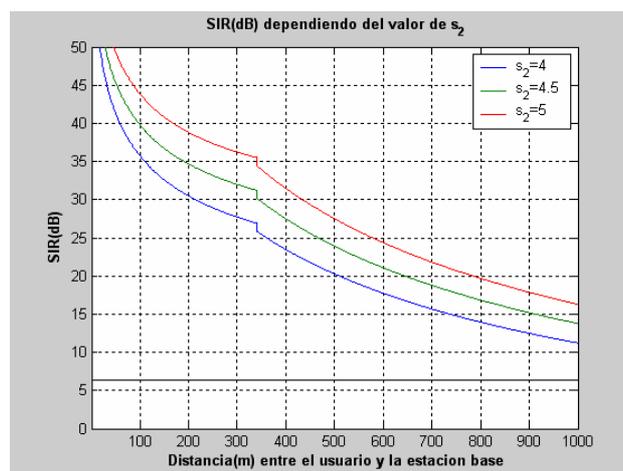


Figura 5-12: SIR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en esta figura, el mejor SIR se consigue para valores más altos del parámetro s_2 , al contrario que pasa en la siguiente figura, en la que el SNR mejora para valores más pequeños de s_2 . Debido a esto, el SINR se comporta como vimos en la Figura 5.11, ya que es una mezcla de ambas influencias.

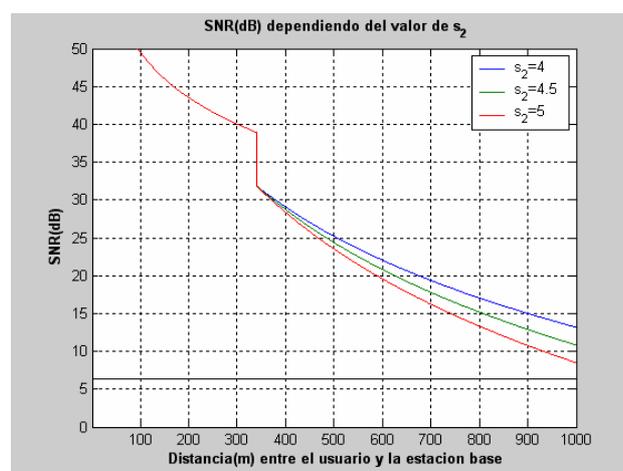


Figura 5-13: SNR dependiendo del valor de s_2

En la Figura 5.14, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_1 :

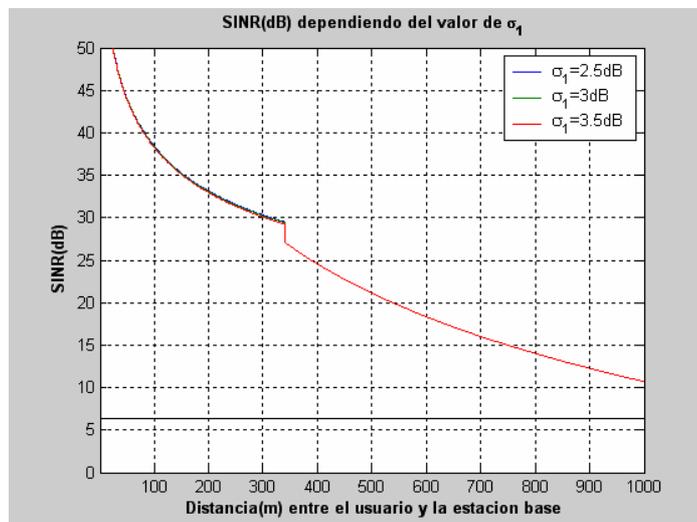


Figura 5-14: SINR dependiendo del valor de σ_1

Como se puede observar, la influencia de la variación del parámetro σ_1 en el SINR es casi nula, algo que se debe a que tanto la influencia de σ_1 en el SNR como en el SIR también es casi nula. Si se quiere un SINR mínimo de 6.4dB, se puede ver que se puede dar cobertura a todo el rango de distancias representadas con cualquier valor de σ_1 .

Esto es debido a que a partir de una distancia igual al punto de ruptura R_b , no influye el parámetro σ_1 de la primera pendiente, y como se puede ver si que influirá el parámetro de la segunda pendiente σ_2 .

Con esto, se puede ver que en el caso de 2 bandas de frecuencia, cualquier valor de σ_1 es posible para dar una buena comunicación (con un SINR superior a 6.4dB) a toda la zona de cobertura.

En la Figura 5.15, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_2 .

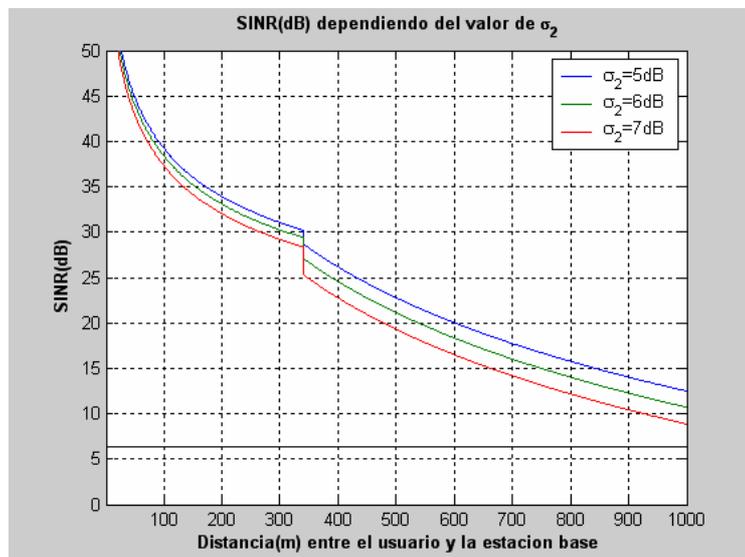


Figura 5-15: SINR dependiendo del valor de σ_2

Como se puede ver en la gráfica, si se quiere un SINR de cómo mínimo el SINR umbral de 6.4dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), se puede ver en la figura, que tanto el valor de σ_2 de 5 como el de 6 como el de 7 son válidos, ya que con cualquiera de ellos se da una comunicación con un SINR mayor que el umbral.

Además se puede ver como una disminución de σ_2 , aumenta el SINR. Esto es debido a que el incremento del valor de σ_2 , incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo de esta manera el SIR, por lo que se reduce también el SINR

Con todo ello se concluye que los 3 valores representados del parámetro σ_2 son válidos ya que se da en todo el rango del sector, una comunicación buena con un SINR mayor que el umbral, que se sitúa en 6.4dB.

En la Figura 5.16, se puede ver como influye la variación de la correlación de shadowing, determinada por el parámetro C_{do} , en la relación señal a ruido, determinada por el parámetro SINR.

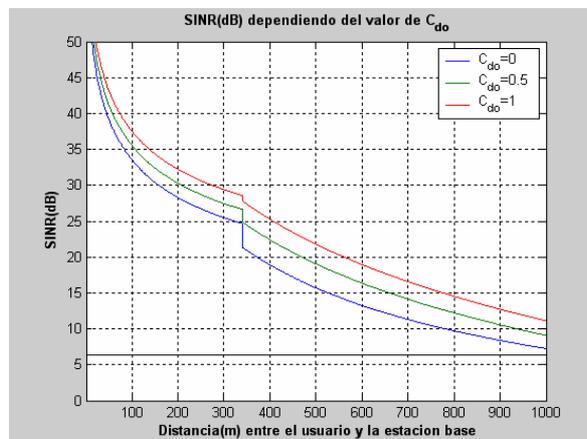


Figura 5-16: SINR dependiendo del valor de la correlación (C_{do})

Como se puede ver se tiene para todos los valores del factor de correlación cubierta toda la zona de cobertura del usuario a la estación base, por lo que cualquier valor de correlación representado (0, 0.5 y 1) es posible en una implementación práctica.

También se puede concluir al observar la gráfica, que el SINR mejora para valores más altos del factor de correlación C_{do} , ya que al aumentar la correlación se aumenta levemente el SINR, esto es debido a que un incremento en el C_{do} , reduce el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que se incrementa el SIR y con ello aumenta el valor del SINR. Además, se puede decir que la correlación no influye para nada en el SNR, ya que ni la potencia recibida ni la potencia de ruido depende de la correlación.

En la Figura 5.17, se puede ver como influye en el SINR la variación de la frecuencia.

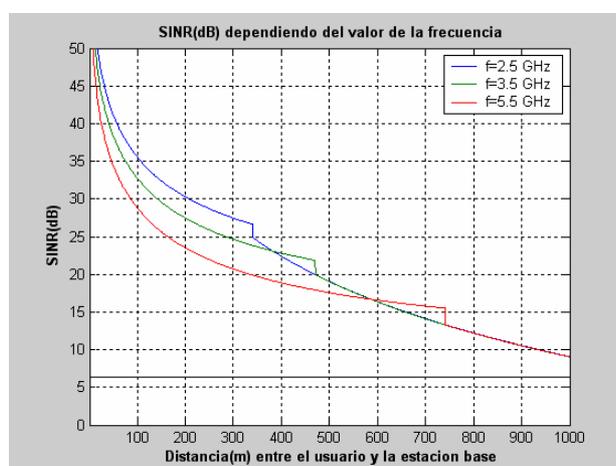


Figura 5-17: SINR dependiendo del valor de la frecuencia y fijando la altura de la antena de la estación base a 10 metros

En WiMAX, el valor de R_b cambia dependiendo del valor de la frecuencia. Esto lo se puede ver mediante la relación entre ambos determinada por la siguiente ecuación:

$$R_b \approx \frac{4 h_b h_m}{\lambda}$$

Se puede considerar el valor de la altura del móvil “ h_m ” como 1 metro (el usuario se encuentra en el interior del vehículo) y la altura de la antena “ h_b ” debe situarse aproximadamente a unos 10 metros, ya que se está en el caso de microceldas.

Con estos datos y a una frecuencia de 2.5 GHz, R_b tiene un valor aproximado de 340m. Para un valor de frecuencia de 3.5 GHz, se tiene un valor de R_b de aproximadamente 470m. Por último, si se considera una frecuencia de 5.5 GHz, se tiene que el valor del parámetro R_b aumenta hasta 740 metros. Con estos dos datos se ha calculado la gráfica anterior.

Como se puede ver en la gráfica, a partir de una distancia de 740m, se tiene el mismo SINR para los 3 valores de frecuencia, siendo este mayor que el umbral en todo el rango del sector. Hasta este valor de distancia, el mejor SINR se obtiene para valores más bajos de la frecuencia. Esto es lógico, porque la frecuencia determina el valor de las pérdidas, y al aumentar la frecuencia, aumentan también las pérdidas. Por ello, disminuye el SNR al aumentar la frecuencia, y por ello, disminuye el SINR. En cambio, el valor del SIR se mantiene constante al variar la frecuencia, ya que aumenta proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia.

Ya que para los 3 valores de frecuencia se tiene un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector, se dedujo que todos los valores representados de la frecuencia son válidos en el modelo de 2 bandas de frecuencia.

Otra forma de hacerlo es fijando el valor de R_b a 340 metros. Con este valor, y para una frecuencia de 2.5GHz, se obtiene que la altura aproximada a la que tendría que situarse la antena es de 10 metros. Si hacemos el mismo análisis pero para una frecuencia de 3.5GHz, la antena de la estación base se tendría que situar a 7.3 metros de altura, un valor que es posible en el caso de WiMAX en microceldas. Por último, para el valor de frecuencia de 5.5GHz, se tendría que la antena tendría que situarse a una altura de 4.7 metros. Esta última altura se podría considerar demasiado pequeña, aunque su validez en una implementación real dependerá de las circunstancias del entorno donde se implantara.

Con estos valores, dejando fijo el valor de R_b y considerando que para cada una de las frecuencias se tendría que situar una antena diferente a una altura determinada, se va a realizar un análisis para ver si los 3 casos son posibles teniendo en cuenta las circunstancias determinadas anteriormente.

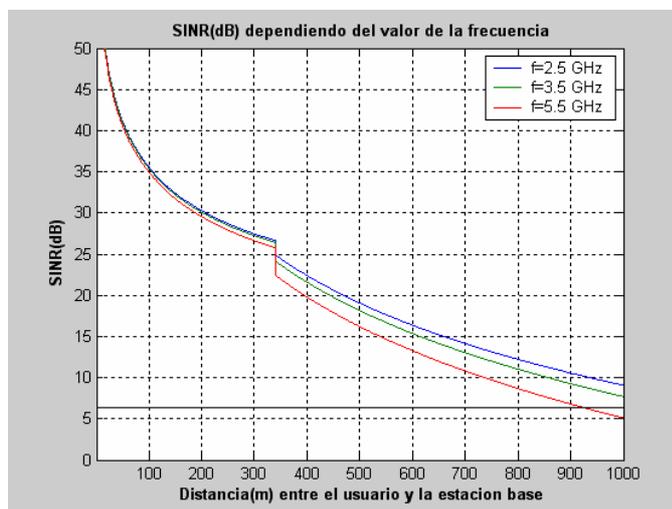


Figura 5-18: SINR dependiendo del valor de la frecuencia y fijando el parámetro R_b a 340 metros

Como se puede ver en la Figura 5.18, el caso de 5.5GHz de frecuencia no es aceptable, ya que nos da un SINR menor que el umbral a partir de una distancia de 923 metros, por lo que, si se quiere dejar fijo el valor de R_b , no se puede trabajar a una frecuencia de 5.5GHz, ya que no conseguimos tener un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector. Esto es debido como dijimos anteriormente a que la antena se tendría que situar a una altura demasiado baja, algo que provoca un aumento de las pérdidas de propagación y de las interferencias y hace que a partir de una distancia, no pose da dar una buena comunicación con un SINR mayor que el umbral de 6.4dB.

Además, se debe fijar como altura mínima a la que puede situarse la antena en microceldas en autopistas en unos 6 metros de altura, ya que se tiene que tener en cuenta el tipo de vehículos que pueden circular por la misma (por ejemplo, autobuses de 2 plantas, camiones especiales, ...).

En la figura 5.19, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de la distancia que hay entre las estaciones base (R es la mitad de la distancia entre las estaciones base).

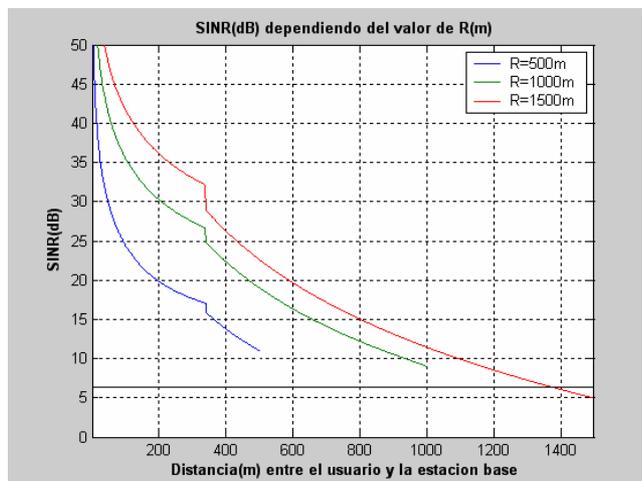


Figura 5-19: SINR dependiendo del valor de R (2R es la distancia entre las estaciones base)

En la gráfica se puede ver como para un R de 500m, se tiene toda la zona de cobertura cubierta con un SINR mayor de 6.4dB en la zona de sector, que en este caso es de 500 metros.

También para el valor de R de 1000m, cubrimos todo el sector (que para este caso es de 1000 metros) con un SINR mayor al umbral de 6.4dB. Otro dato importante, es que cuanto mayor es R, mayor es el SINR. Esto es lógico, ya que a mayor tamaño del sector, más alejadas están las estaciones base interferentes, por lo cual menor es la potencia de las interferencias. A su vez se puede ver como para el caso de R igual a 1500 metros, no cubrimos todo el rango del sector, que para este caso son 1500 metros, por lo que en el caso de 2 bandas de frecuencia no se puede tener un radio de trabajo de 1500 metros, siendo el radio posible máximo de 1390 metros.

Como conclusión, se tiene que cuando se aumenta la distancia que existen entre las estaciones base, se aumenta el SIR (manteniéndose constante el SNR, ya que tanto la potencia Recibida como la potencia de ruido se mantienen constantes) lo que conlleva a un aumento del SINR como se ha expuesto anteriormente. Esto es debido a que, para una distancia dada desde la estación base, reduciendo el valor de R se incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo así el valor del SIR, por lo que también se produce una reducción del SINR.

En la Figura 5.20, se puede ver como afecta la variación de la potencia de transmisión al SINR.

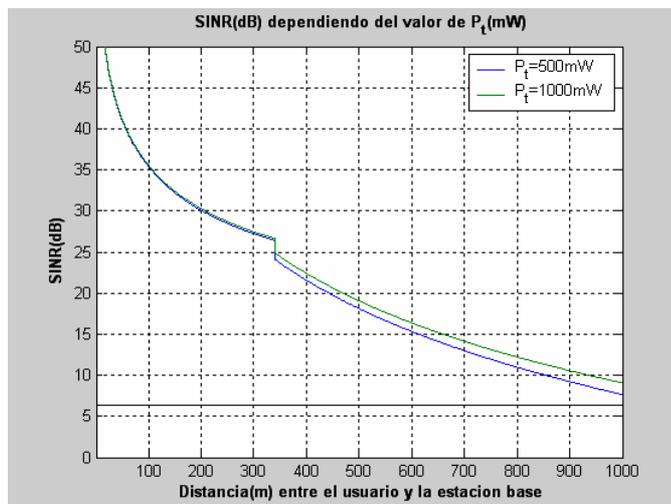


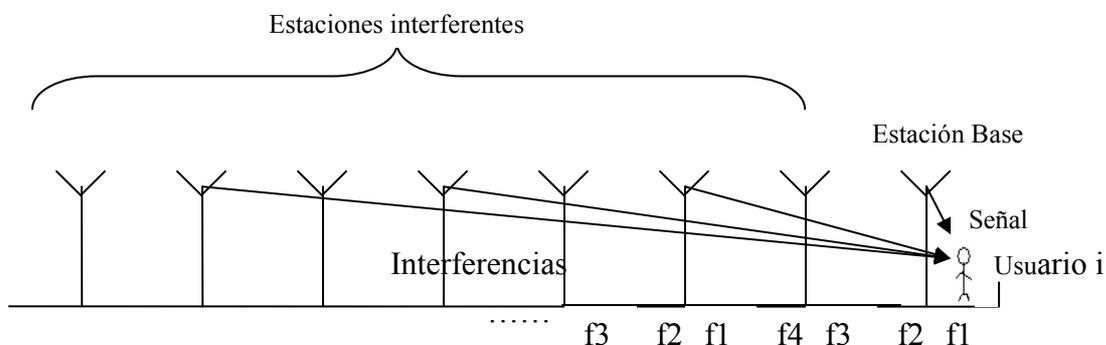
Figura 5-20: SINR dependiendo del valor de la Potencia de transmisión

Como se puede ver en la gráfica, los dos valores representados de la Potencia de transmisión son válidos ya que nos dan un SINR mayor a 6.4dB en todo el sector, por lo que dichos valores se puede considerar bueno en el caso de 2 bandas de frecuencia.

Además se puede observar que a medida que se aumenta la potencia de transmisión aumenta la Relación Señal a Ruido e Interferencia. Esto es lógico ya que al aumentar la potencia de transmisión se aumenta proporcionalmente la potencia recibida, por lo que se aumenta el SNR (Relación señal a ruido) y con ello se produce un aumento en el SINR. Se debe tener en cuenta de que la Relación señal a interferencia SIR no varía con la variación de la potencia transmitida (las interferencias aumentan o disminuyen proporcionalmente con la potencia de transmisión), por lo que el motivo por el que varía el SINR es únicamente porque al aumentar la potencia de transmisión aumenta la potencia recibida, por lo que el SNR aumenta.

5.2.3.4 Cuatro bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros

La situación con la que nos encontramos es la siguiente:



La Figura 5.21 nos muestra como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_1 .

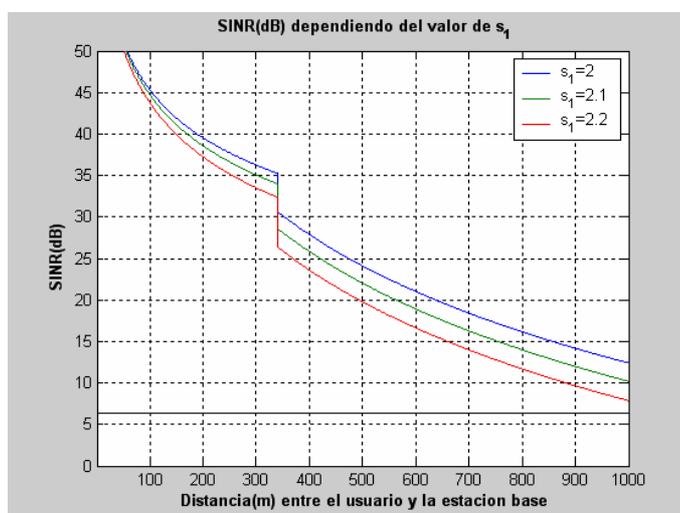


Figura 5-21: SINR dependiendo del valor de s_1

En la Figura 5.21, se puede ver como influye la variación del parámetro s_1 . Como se puede ver, el SINR mejora para un valor más bajo de s_1 . Si se quiere un SINR umbral de 6.4dB, se puede ver que los 3 valores representados de s_1 son posibles, ya que nos dan un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector.

Con ello, se concluye que un valor más bajo de s_1 mejora el SNR con lo que se mejora el SINR, mientras que el SIR se mantiene constante cuando se varía el parámetro s_1 .

En la Figura 5.22 se puede ver como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_2 .

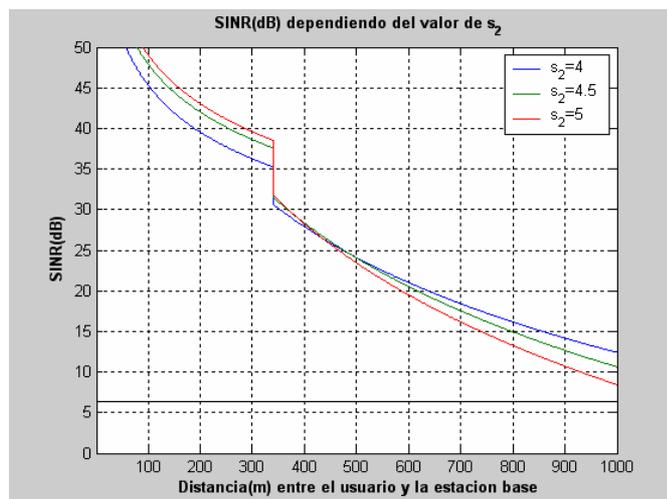


Figura 5-22: SINR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en la gráfica, de los valores del parámetro s_2 representados (4, 4.5 y 5), se da cobertura a todo el rango del sector con un SINR mayor que el umbral de 6.4dB para los 3 valores, por lo que los 3 son posibles para dicho parámetro en el caso de 4 bandas de frecuencia.

En este caso, se puede ver como dependiendo de la distancia, la influencia del parámetro varía considerablemente. Si nos fijamos en distancias menores a 420 metros, el SINR mejora con valores mayores del parámetro s_2 . A partir de esta distancia, esta influencia cambia, teniendo el mejor SINR para el valor más bajo de s_2 .

Esta variación dependiendo de la distancia a la que se sitúe el usuario respecto a la estación base es debido a que en cada tramo de la gráfica (hasta 420 metros y a partir de esta distancia) influyen diferentes fenómenos. Hasta una distancia de 420 metros, existe un mejor aislamiento, lo que produce una menor interferencia y por ello el SINR es mayor para valores más altos del parámetro s_2 . En cambio a partir de esta distancia, se produce un aumento en las pérdidas por un aumento de la distancia lo que produce que se consiga un mayor SINR con valores más pequeños del parámetro s_2 . El punto de cambio se produce cuando ambos fenómenos se restan a una distancia de 420 metros.

En el caso de este parámetro, la variación de s_2 influye tanto en el SIR como en el SNR (en este caso la variación se observa únicamente a partir de la distancia R_b), como ya vimos para el caso de 2 bandas de frecuencia.

En la figura 5.23, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_1 .

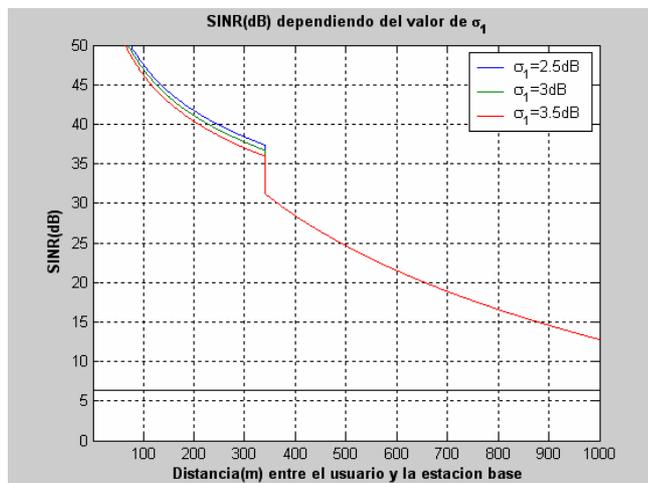


Figura 5-23: SINR dependiendo del valor de σ_1

Como se puede observar, la influencia de la variación del parámetro σ_1 en el SINR es nula para distancias mayores a 340 metros. Si se quiere un SINR mínimo de 6.4dB, se puede ver que se puede dar cobertura a todo el rango de distancias representadas con cualquier valor de σ_1 .

Hasta un valor de distancia entre el usuario y la estación base de 340m, si se puede ver una pequeña variación en el SINR para los diferentes valores del parámetro σ_1 , siendo esta variación de 1dB aproximadamente entre los valores de σ_1 de 2.5 y 3.5. Esta variación en distancias menores a 340 metros, es debida únicamente a que al aumentar el valor de σ_1 se reduce el valor del SNR (como se puede ver en la siguiente figura), y por ello, se reduce también el valor del SINR, mientras que el SIR se mantiene constante.

Este efecto sobre las prestaciones de WiMAX en distancias menores de 340 metros es nulo, ya que se está en un SINR de 35dB y más, y como pudimos ver en la Tabla 5.2 donde se podía ver el SINR requerido en función del esquema de modulación, en WiMAX sólo afecta el SINR entre 6.4dB y 24dB.

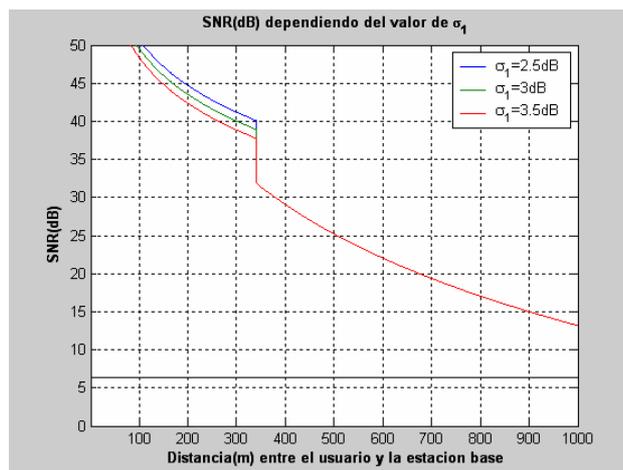


Figura 5-24: SNR dependiendo del valor de σ_1

Con esto, se puede ver que en el caso de 4 bandas de frecuencia, cualquier valor de σ_1 es posible para dar una buena comunicación (con un SINR superior a 6.4dB) a toda la zona de cobertura.

En la Figura 5.25, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_2 .

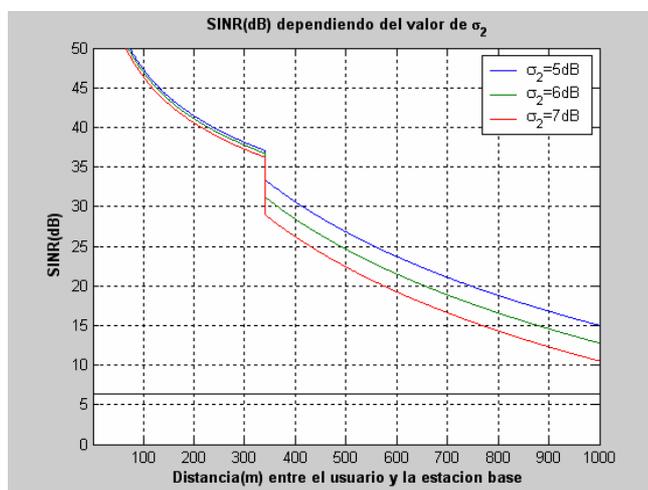


Figura 5-25: SINR dependiendo del valor de σ_2

Como se puede ver en la gráfica, si se quiere un SINR de cómo mínimo el SINR umbral de 6.4dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), se puede ver en la figura, que tanto el valor de σ_2 de 5 como el de 6 como el de 7 son válidos, ya que con cualquiera de ellos se da una comunicación con un SINR mayor que el umbral.

Además se puede ver como una disminución de σ_2 , aumenta el SINR notablemente. Esto es debido a que el incremento del valor de σ_2 , incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo de esta manera el SIR y por ello, también se reduce el SINR

Con todo ello se concluye que los 3 valores representados del parámetro σ_2 son válidos ya que se da en todo el rango del sector, una comunicación buena con un SINR mayor que el umbral, que se sitúa en 6.4dB.

En la Figura 5.26, se puede ver como influye la variación de la correlación de shadowing, determinada por el parámetro C_{do} , en la relación señal a ruido, determinada por el parámetro SINR.

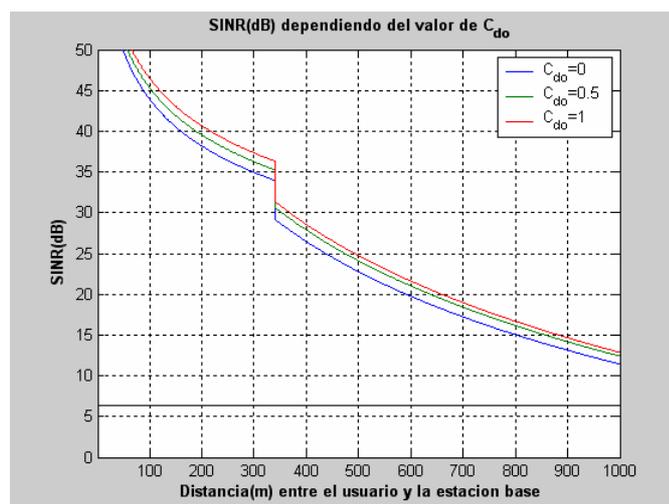


Figura 5-26: SINR dependiendo del valor de la correlación (C_{do})

Como se puede ver se tiene para todos los valores del factor de correlación cubierta toda la zona de cobertura del usuario a la estación base, por lo que cualquier valor de correlación representado (0, 0.5 y 1) es posible en una implementación práctica.

También se puede concluir al observar la gráfica, que el SINR mejora para valores más altos del factor de correlación C_{do} . Esto es debido a que al aumentar la correlación se aumenta levemente el SINR, esto es debido a que un incremento en el C_{do} , reduce el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que se incrementa el SIR y con ello aumenta el valor del SINR. Además, se puede decir que la correlación no influye para nada en el SNR, ya que ni la potencia recibida ni la potencia de ruido depende de la correlación.

En la Figura 5.27, se puede ver como influye en el SINR la variación de la frecuencia.

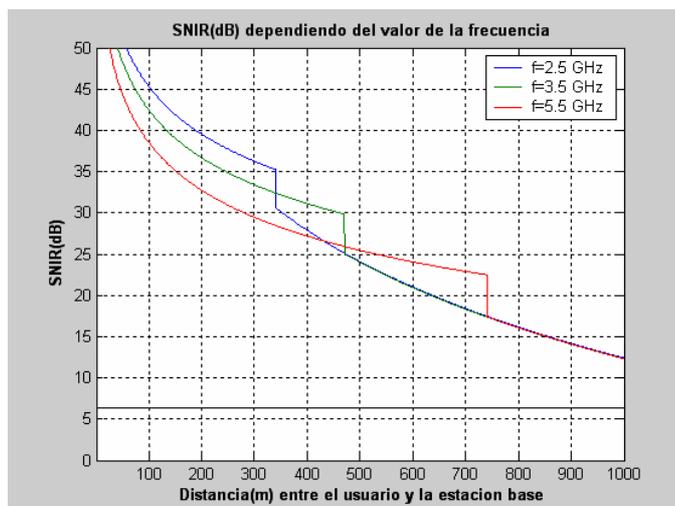


Figura 5-27: SINR dependiendo del valor de la frecuencia y fijando la altura de la antena de la estación base a 10 metros

Como se explica en el caso de 2 bandas de frecuencia, primero se ha realizado el análisis de la influencia en el SINR de la variación de la frecuencia, poniendo un valor de R_b diferente para cada valor de la frecuencia, teniendo como altura al que situaremos la antena en 10 metros.

Como se puede ver en la gráfica, a partir de una distancia de 740m, se tiene el mismo SINR para los 3 valores de frecuencia, siendo este mayor que el umbral en todo el rango del sector. Hasta este valor de distancia, el mejor SINR se obtiene para valores más bajos de la frecuencia. Esto es lógico, porque la frecuencia determina el valor de las pérdidas, y al aumentar la frecuencia, aumentan también las pérdidas. Por ello, disminuye el SNR al aumentar la frecuencia, y por ello, disminuye el SINR. En cambio, el valor del SIR se mantiene constante al variar la frecuencia, ya que aumenta proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia.

Ya que para los 3 valores de frecuencia se tiene un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector, se dedujo que todos los valores representados de la frecuencia son válidos en el modelo de 2 bandas de frecuencia.

Otra forma de hacerlo es fijando el valor de R_b a 340 metros. Con este valor, y para una frecuencia de 2.5GHz, se tiene que la altura aproximada a la que tendría que situarse la antena es de 10 metros. Si hacemos el mismo análisis pero para una frecuencia de 3.5GHz, la antena de la estación base se tendría que situar a 7.3 metros de altura, un valor que es posible en el caso de WiMAX en microceldas. Por último, para el valor de frecuencia de 5.5GHz, se tendría que la antena tendría que situarse a una altura de 4.7 metros. Esta última altura se podría considerar

demasiado pequeña, aunque su validez en una implementación real dependerá de las circunstancias del entorno donde se implantara.

Con estos valores, dejando fijo el valor de R_b y considerando que para cada una de las frecuencias se tendría que situar una antena diferente a una altura determinada, se va a realizar un análisis para ver si los 3 casos son posibles teniendo en cuenta las circunstancias determinadas anteriormente.

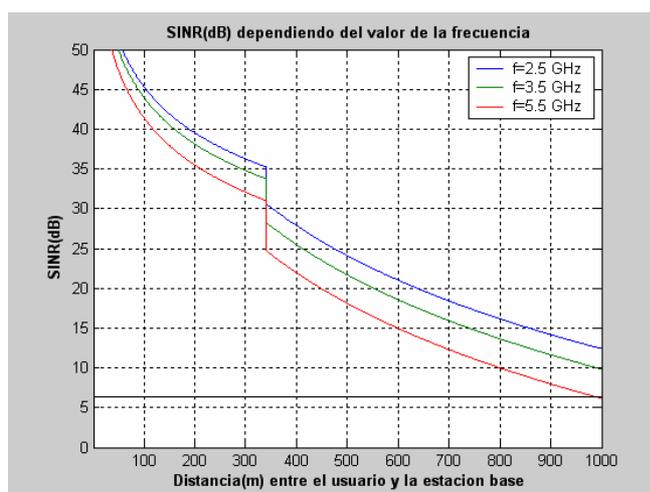


Figura 5-28: SINR dependiendo del valor de la frecuencia y fijando el parámetro R_b a 340 metros

Al igual que pasaba para el caso de 2 bandas de frecuencia, el valor de la frecuencia de 5.5GHz no es posible, ya que nos da un SINR menor que el umbral a partir de una distancia de 980 metros, por lo que, si se quiere dejar fijo el valor de R_b a 340 metros no se puede trabajar a una frecuencia de 5.5GHz, ya que no conseguimos tener un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector. Esto es debido como dijimos anteriormente a que la antena se tendría que situar a una altura demasiado baja, algo que provoca un aumento de las pérdidas de propagación y de las interferencias y hace que a partir de una distancia, no pose da dar una buena comunicación con un SINR mayor que el umbral de 6.4dB.

En la Figura 5.29, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de la distancia que hay entre las estaciones base (R es la mitad de la distancia entre las estaciones base).

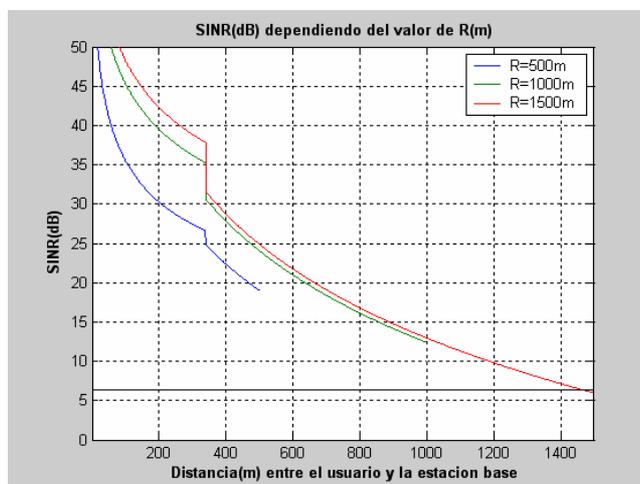


Figura 5-29: SINR dependiendo del valor de R (2R es la distancia entre las estaciones base)

En la gráfica se puede ver como para un R de 500m, se tiene toda la zona de cobertura cubierta con un SINR mayor de 6.4dB en la zona de sector, que en este caso es de 500 metros.

También para el valor de R de 1000m, cubrimos todo el sector (que para este caso es de 1000 metros) con un SINR mayor al umbral de 6.4dB. Otro dato importante, es que cuanto mayor es R, mayor es el SINR. Esto es lógico, ya que a mayor tamaño del sector, más alejadas están las estaciones base interferentes, por lo cual menor es la potencia de las interferencias. A su vez se puede ver como para el caso de R igual a 1500 metros, no cubrimos todo el rango del sector, que para este caso son 1500 metros, por lo que en el caso de 2 bandas de frecuencia no se puede situar las antenas a esta distancia.

Como conclusión, se tiene que cuando se aumenta la distancia que existen entre las estaciones base, se aumenta el SIR (manteniéndose constante el SNR, ya que tanto la potencia Recibida como la potencia de ruido se mantienen constantes) lo que conlleva a un aumento del SINR como se ha expuesto anteriormente. Esto es debido a que, para una distancia dada desde la estación base, reduciendo el valor de R se incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo así el valor del SIR, por lo que también se produce una reducción del SINR.

En la Figura 5.30, se puede ver como afecta la variación de la potencia de transmisión al SINR.

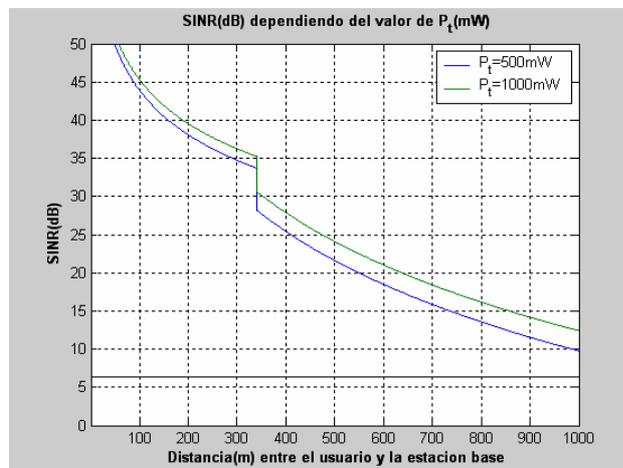


Figura 5-30: SINR dependiendo del valor de la potencia de transmisión

Como se puede ver en la gráfica, los dos valores representados de la potencia de transmisión son válidos ya que nos dan un SINR mayor a 6.4dB en todo el sector, por lo que dichos valores se puede considerar bueno en el caso de 4 bandas de frecuencia.

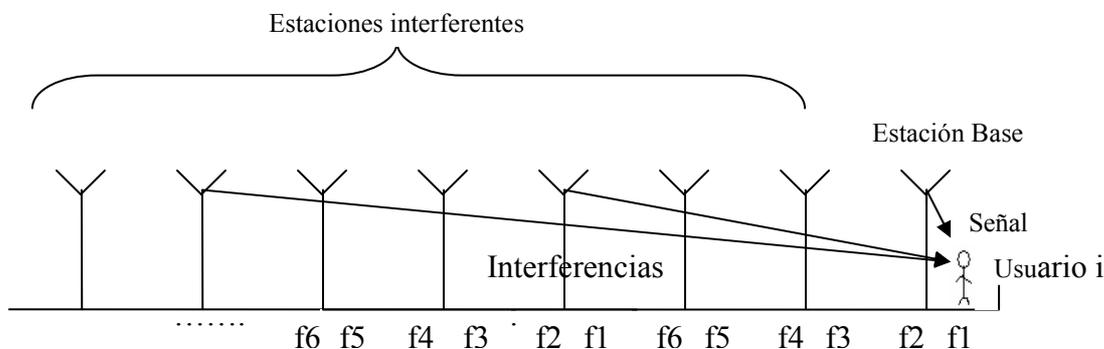
Como se puede ver en la gráfica, a medida que se aumenta la potencia de transmisión aumenta la Relación Señal a Ruido e Interferencia. Esto es lógico ya que al aumentar la potencia de transmisión se aumenta proporcionalmente la potencia recibida, por lo que se aumenta el SNR (Relación señal a ruido) y con ello se produce un aumento en el SINR. Se debe tener en cuenta de que la Relación señal a interferencia SIR no varía con la variación de la potencia transmitida (las interferencias aumentan o disminuyen proporcionalmente con la potencia de transmisión), por lo que el motivo por el que varía el SINR es únicamente porque al aumentar la potencia de transmisión aumenta la potencia recibida, por lo que el SNR aumenta.

A su vez, si se compara con el caso de 2 bandas de frecuencia, la potencia de transmisión influye de una manera mayor en el caso de 4 bandas de frecuencia. Esto es debido a que, en el caso de 2 bandas de frecuencia, la interferencia es mayor que para el caso de 4 bandas de frecuencia en el que la interferencia es menor por lo que se nota más la influencia del ruido. Con ello, en el caso de 4 bandas de frecuencia, el SNR tiene una influencia mayor y por ello, la variación de la potencia de transmisión tiene mayor influencia en el SINR. A su vez, se verá como en el caso de 6 bandas de frecuencia, la variación de la Potencia transmitida tendrá una mayor influencia en el SINR.

Si se compara en general los casos de 2 y 4 bandas de frecuencia, se puede ver como ya dijimos al principio, que con 4 bandas de frecuencia conseguimos una mejora en el SINR de aproximadamente 4dB respecto al caso de 2 bandas de frecuencia.

5.2.3.5 Seis bandas de frecuencia: Influencia de los parámetros

La situación en la que nos encontramos es la siguiente:



La Figura 5.31 nos muestra como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_1 .

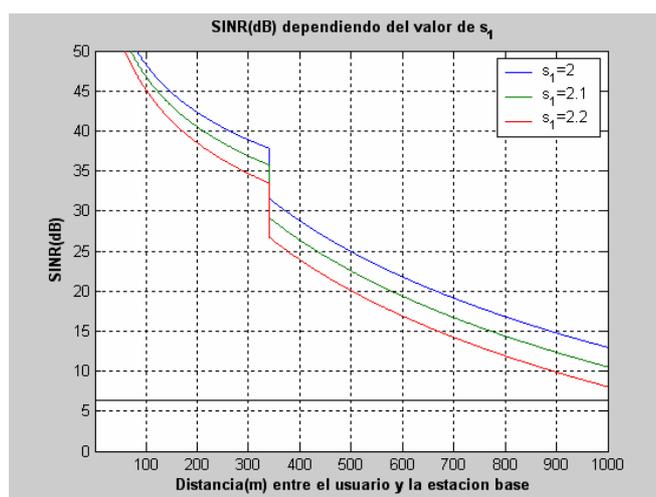


Figura 5-31: SINR dependiendo del valor de s_1

En la Figura 5.31, se puede ver como influye la variación del parámetro s_1 . Como se puede ver, el SINR mejora para un valor más bajo de s_1 , esto es debido a que el SNR mejora para un valor más bajo de s_1 , lo que hace que el SINR mejore de la misma manera. Si se quiere un SINR umbral de 6.4dB, se puede ver que los 3 valores representados de s_1 son posibles, ya que nos dan un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector. Al igual que en el caso de 4 bandas de frecuencia, el valor del s_1 de 2.2 si nos da una mayor fiabilidad que el caso de 2 bandas de frecuencia, ya que en el extremo del rango del sector (1000 metros) se tiene un SINR de 8dB.

Además, para 6 bandas de frecuencia, existe una mayor influencia que para el caso anterior. Esto es debido a que al aumentar el número de bandas, las interferencias se hacen más

pequeñas, por lo que pasa a tener una mayor influencia la relación que existe entre la señal y el ruido, que la que tiene la relación entre la señal y las interferencias.

En la Figura 5.32 se puede ver como varía el SINR dependiendo del valor del parámetro s_2 .

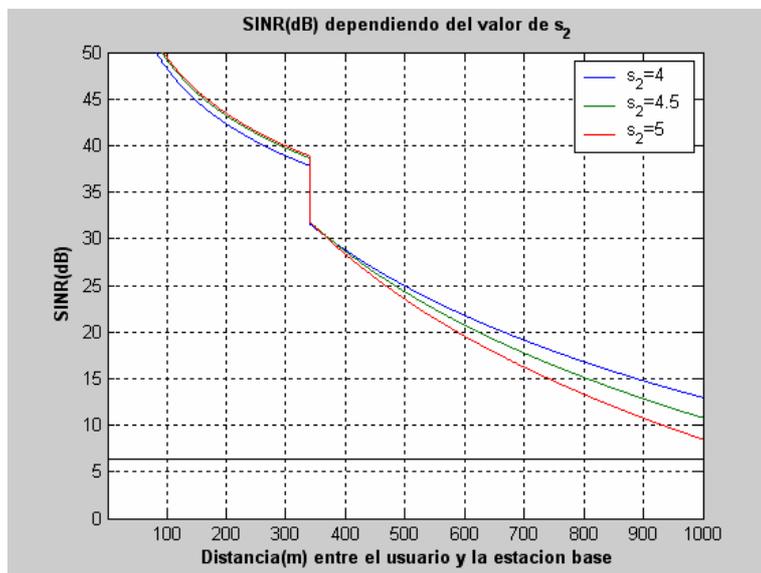


Figura 5-32: SINR dependiendo del valor de s_2

Como se puede ver en la gráfica, de los valores del parámetro s_2 representados (4, 4.5 y 5), se da cobertura a todo el rango del sector con un SINR mayor que el umbral de 6.4dB para los 3 valores, por lo que los 3 son posibles para dicho parámetro en el caso de 6 bandas de frecuencia, al igual que pasaba para el caso de 4 bandas de frecuencia.

En este caso, se puede ver como dependiendo de la distancia, la influencia del parámetro varía considerablemente. Si nos fijamos en distancias menores a 340 metros, el SINR mejora con valores mayores del parámetro s_2 . A partir de esta distancia, esta influencia cambia, teniendo el mejor SINR para el valor más bajo de s_2 .

Esta variación dependiendo de la distancia a la que se sitúe el usuario respecto a la estación base es debido a que en cada tramo de la gráfica (hasta 400 metros y a partir de esta distancia) influyen diferentes fenómenos. Hasta una distancia de 400 metros, existe un mejor aislamiento, lo que produce una menor interferencia y por ello el SINR es mayor para valores más altos del parámetro s_2 . En cambio a partir de esta distancia, se produce un aumento en las pérdidas por un aumento de la distancia lo que produce que se consiga un mayor SINR con valores más pequeños del parámetro s_2 . El punto de cambio se produce cuando ambos fenómenos se restan a una distancia de 400 metros.

En el caso de este parámetro, la variación de s_2 influye tanto en el SIR como en el SNR (en este caso la variación se observa únicamente a partir de la distancia R_b), como ya vimos para los casos de 2 y 4 bandas de frecuencia.

En la figura 5.33, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_1 .

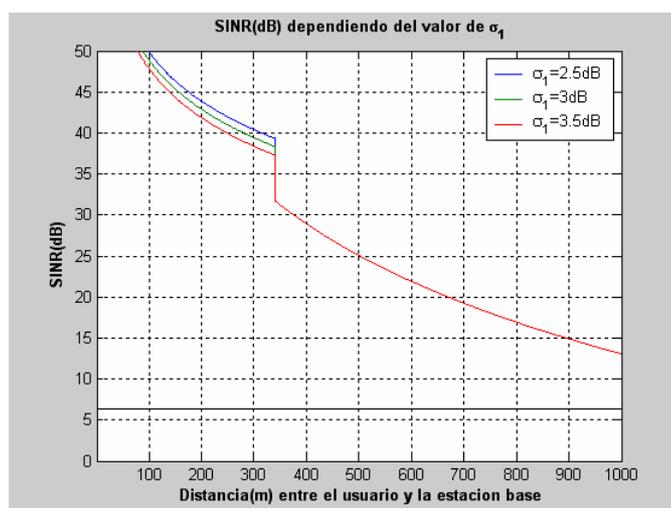


Figura 5-33: SINR dependiendo del valor de σ_1

Como se puede observar, la influencia de la variación del parámetro σ_1 en el SINR es nula para distancias mayores a 340 metros, esto es debido a que tanto la influencia de σ_1 en el SNR como en el SIR es nula también. Si se quiere un SINR mínimo de 6.4dB, se puede ver que se puede dar cobertura a todo el rango de distancias representadas con cualquier valor de σ_1 .

Hasta un valor de distancia entre el usuario y la estación base de 340m, si se puede ver una pequeña variación en el SINR para los diferentes valores del parámetro σ_1 , siendo esta variación de 2dB aproximadamente entre los valores de σ_1 de 2.5 y 3.5. Como vimos en el caso de 4 bandas de frecuencia, esto es debido a una variación en el SNR como se puede ver en la siguiente figura:

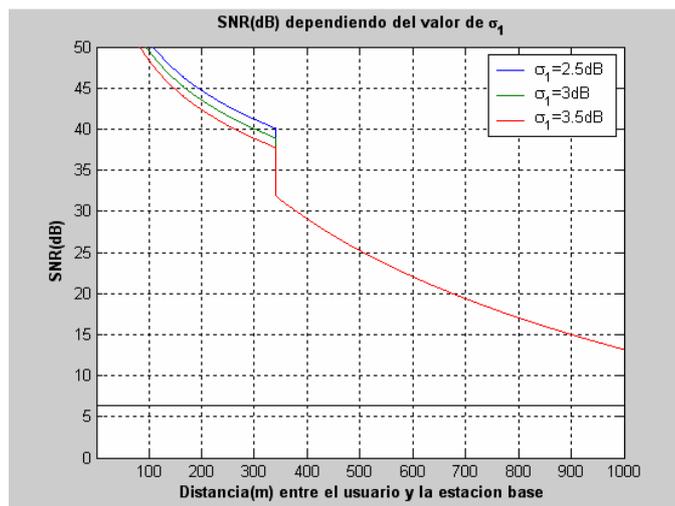


Figura 5-34: SNR dependiendo del valor de σ_1

Con esto, se puede ver que en el caso de 6 bandas de frecuencia, cualquier valor de σ_1 es posible para dar una buena comunicación (con un SINR superior a 6.4dB) a toda la zona de cobertura, al igual que pasaba para los casos anteriores de 2 y 4 bandas de frecuencia.

En la Figura 5.35, se puede ver la influencia que tiene en el SINR (Relación Señal a Ruido e Interferencia), la variación de σ_2 .

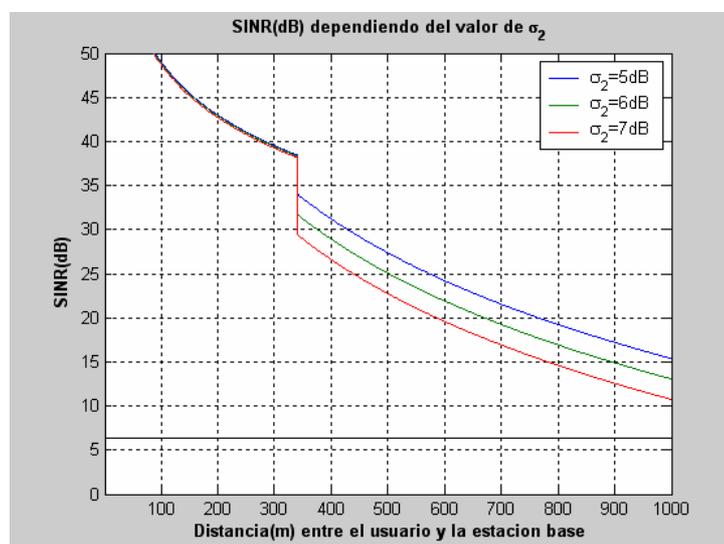


Figura 5-35: SINR dependiendo del valor de σ_2

Como se puede ver en la gráfica, si se quiere un SINR de cómo mínimo el SINR umbral de 6.4dB (marcado en la figura por la línea horizontal negra), se puede ver en la figura, que todos los valores de σ_2 (5, 6 y 7) son válidos, ya que con cualquiera de ellos se da una comunicación con un SINR mayor que el umbral.

Además se puede ver como una disminución de σ_2 , aumenta el SINR. Esto es debido a que el incremento del valor de σ_2 , incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo de esta manera el SIR, por lo que se reduce también el SINR

Con todo ello se concluye que los 3 valores representados del parámetro σ_2 son válidos para el caso de 6 bandas de frecuencia, ya que se da en todo el rango del sector, una comunicación buena con un SINR mayor que el umbral, que se sitúa en 6.4dB.

En la Figura 5.36, se puede ver como influye la variación de la correlación de shadowing, determinada por el parámetro C_{do} , en el SINR.

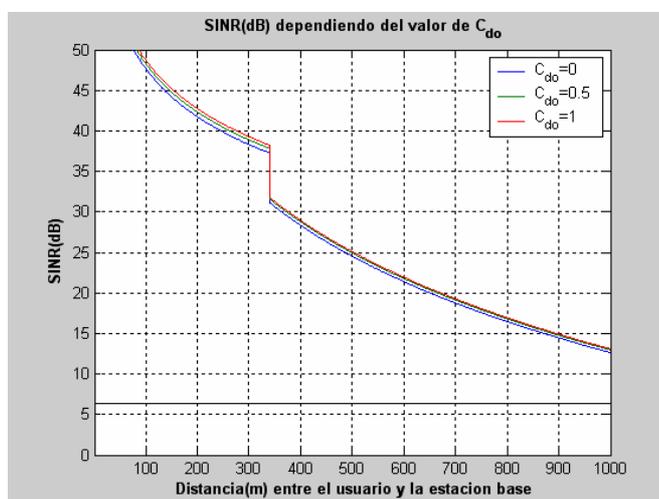


Figura 5-36: SINR dependiendo del valor de la correlación (C_{do})

Como se puede ver se tiene para todos los valores del factor de correlación cubierta toda la zona de cobertura del usuario a la estación base, por lo que cualquier valor de correlación representado (0, 0.5 y 1) es posible en una implementación práctica.

Además, también obsérvese va que al aumentar la correlación se aumenta levemente el SINR, esto es debido a que un incremento en el C_{do} , reduce el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que se incrementa el SIR y con ello aumenta el valor del SINR. Además, se puede decir que la correlación no influye para nada en el SNR, ya que ni la potencia recibida ni la potencia de ruido depende de la correlación.

En la Figura 5.37, se puede ver como influye en el SINR la variación de la frecuencia.

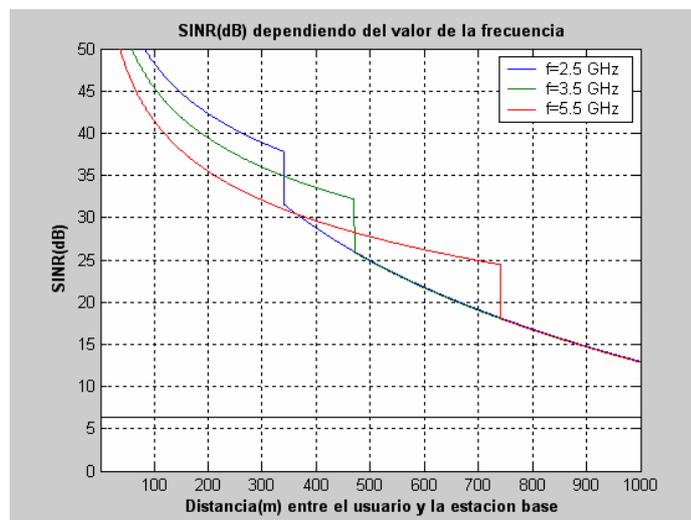


Figura 5-37: SINR dependiendo del valor de la frecuencia y fijando la altura de la antena de la estación base a 10 metros

Esta gráfica corresponde, como ya se explica en el caso de 2 bandas de frecuencia, para la variación de la frecuencia, fijando la altura a la que situaremos la antena en la estación base, y con ello, variando el valor del punto de ruptura para cada valor de frecuencia.

Como se puede ver en la gráfica, a partir de una distancia de 740m, se tiene el mismo SINR para los 3 valores de frecuencia, siendo este mayor que el umbral en todo el rango del sector. Hasta este valor de distancia, el mejor SINR se obtiene para valores más bajos de la frecuencia. Esto es lógico, porque la frecuencia determina el valor de las pérdidas, y al aumentar la frecuencia, aumentan también las pérdidas. Por ello, disminuye el SNR al aumentar la frecuencia, y por ello, disminuye el SINR. En cambio, el valor del SIR se mantiene constante al variar la frecuencia, ya que aumenta proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia.

Ya que para los 3 valores de frecuencia se tiene un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector, se dedujo que todos los valores representados de la frecuencia son válidos en el modelo de 6 bandas de frecuencia.

Otra forma de hacerlo es fijando el valor de R_b a 340 metros. Con este valor, y para una frecuencia de 2.5GHz, se tiene que la altura aproximada a la que tendría que situarse la antena es de 10 metros. Si hacemos el mismo análisis pero para una frecuencia de 3.5GHz, la antena de la estación base se tendría que situar a 7.3 metros de altura, un valor que es posible en el caso de WiMAX en microceldas. Por último, para el valor de frecuencia de 5.5GHz, se tendría que la antena tendría que situarse a una altura de 4.7 metros. Esta última altura se podría considerar

demasiado pequeña, aunque su validez en una implementación real dependerá de las circunstancias del entorno donde se implantara.

Con estos valores, dejando fijo el valor de R_b y considerando que para cada una de las frecuencias se tendría que situar una antena diferente a una altura determinada, se va a realizar un análisis para ver si los 3 casos son posibles teniendo en cuenta las circunstancias determinadas anteriormente.

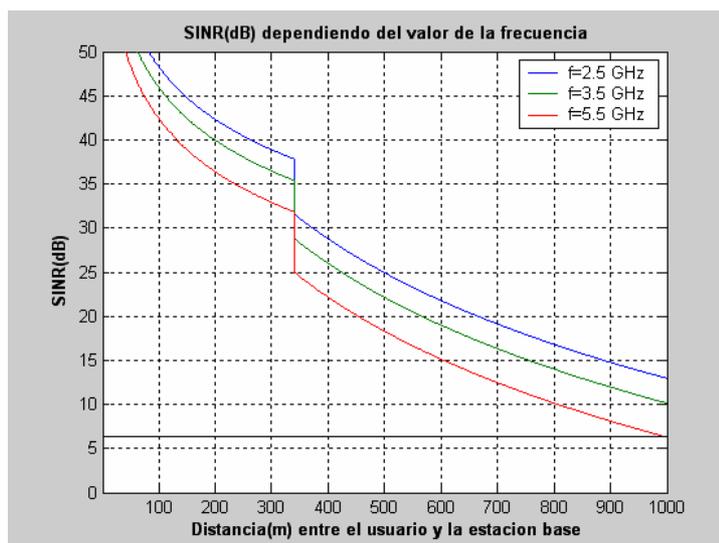


Figura 5-38: SINR dependiendo del valor de la frecuencia y fijando el parámetro R_b a 340 metros

Al igual que pasaba en los casos anteriores, el valor de la frecuencia de 5.5GHz no es posible, ya que nos da un SINR menor que el umbral a partir de una distancia de 980 metros, por lo que, si se quiere dejar fijo el valor de R_b a 340 metros no se puede trabajar a una frecuencia de 5.5GHz, ya que no conseguimos tener un SINR mayor que el umbral en todo el rango del sector. Esto es debido como dijimos anteriormente a que la antena se tendría que situar a una altura demasiado baja, algo que provoca un aumento de las pérdidas de propagación y de las interferencias y hace que a partir de una distancia, no posea dar una buena comunicación con un SINR mayor que el umbral de 6.4dB.

En la figura 5.39, se puede ver la influencia que tiene en el SINR la variación de la distancia que hay entre las estaciones base (R es la mitad de la distancia entre las estaciones base).

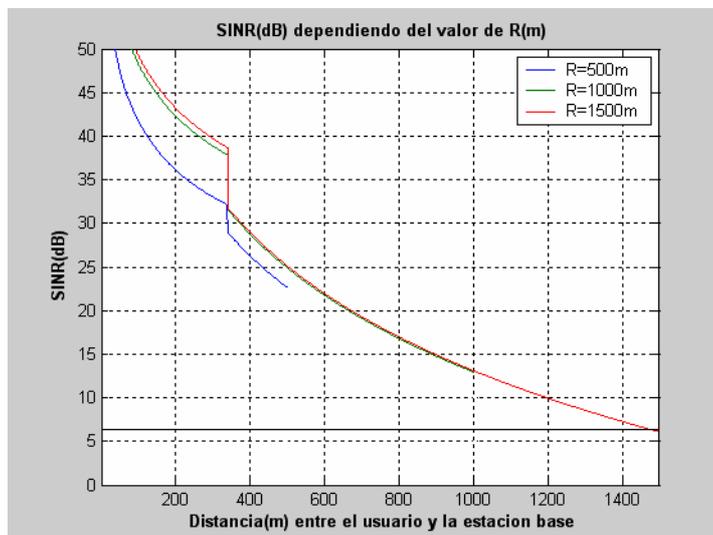


Figura 5-39: SINR dependiendo del valor de R (2R es la distancia entre las estaciones base)

Al igual que nos pasaba para los casos de 2 y 4 bandas de frecuencia, como se puede ver en la Figura 5.39, se tiene que para un R de 500m, se tiene toda la zona de cobertura cubierta con un SINR mayor de 6.4dB en la zona de sector, que en este caso es de 500 metros.

También para el valor de R de 1000m, cubrimos todo el sector (que para este caso es de 1000 metros) con un SINR mayor al umbral de 6.4dB. Otro dato importante, es que cuanto mayor es R, mayor es el SINR. Esto es lógico, ya que a mayor tamaño del sector, más alejadas están las estaciones base interferentes, por lo cual menor es la Potencia de las interferencias. A su vez se puede ver como para el caso de R igual a 1500 metros, no cubrimos todo el rango del sector, que para este caso son 1500 metros, por lo que en el caso de 6 bandas de frecuencia no se puede situar las antenas a esta distancia, siendo la distancia máxima a la que puede situar el usuario aproximadamente de 1470 metros.

Como conclusión, se tiene que cuando se aumenta la distancia que existen entre las estaciones base, se aumenta el SIR (manteniéndose constante el SNR, ya que tanto la potencia Recibida como la potencia de ruido se mantienen constantes) lo que conlleva a un aumento del SINR como se ha expuesto anteriormente. Esto es debido a que, para una distancia dada desde la estación base, reduciendo el valor de R se incrementa el valor esperado y la varianza de la interferencia, reduciendo así el valor del SIR, por lo que también se produce una reducción del SINR.

En la Figura 5.40, se puede ver como afecta la variación de la potencia de transmisión al SINR.

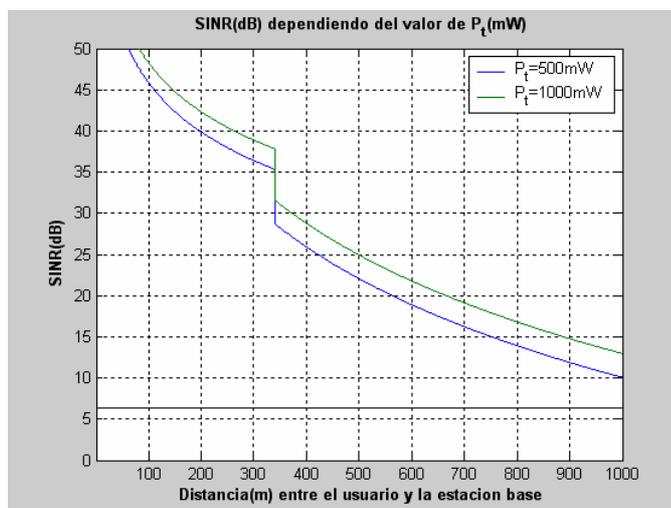


Figura 5-40: SINR dependiendo del valor de la potencia de transmisión

Como se puede ver en la gráfica, los dos valores representados de la potencia de transmisión son válidos ya que nos dan un SINR mayor a 6.4dB en todo el sector, por lo que dichos valores se puede considerar bueno en el caso de 6 bandas de frecuencia.

Además se puede observar que a medida que se aumenta la potencia de transmisión aumenta la Relación Señal a Ruido e Interferencia. Esto es lógico ya que al aumentar la potencia de transmisión se aumenta proporcionalmente la potencia recibida, por lo que se aumenta el SNR (Relación señal a ruido) y con ello se produce un aumento en el SINR. Se debe tener en cuenta de que la Relación señal a interferencia SIR no varía con la variación de la potencia transmitida (las interferencias aumentan o disminuyen proporcionalmente con la potencia de transmisión), por lo que el motivo por el que varía el SINR es únicamente porque al aumentar la potencia de transmisión aumenta la potencia recibida, por lo que el SNR aumenta.

Si se compara en general los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia, se puede ver como ya dijimos al principio, que con 6 bandas de frecuencia conseguimos una mejora en el SINR de aproximadamente 4dB respecto al caso de 2 bandas de frecuencia. Como ya dijimos en el caso de 4 bandas de frecuencia, la potencia de transmisión influye de una manera mayor en el caso de 6 bandas de frecuencia que en el caso de 4 bandas de frecuencia. Esto es debido a que, en el caso de 4 bandas de frecuencia, la interferencia es mayor que para el caso de 6 bandas de frecuencia en el que la interferencia es menor por lo que se nota más la influencia del ruido. Con ello, en el caso de 6 bandas de frecuencia, el SNR tiene una influencia mayor y por ello, la variación de la potencia de transmisión tiene mayor influencia en el SINR.

5.3 Conclusiones de WiMAX

Como ya dijimos al observar en el caso general las 3 curvas que determinaban cada uno de los casos (2, 4 y 6 bandas de frecuencia), los 3 casos son casos posibles ya que se da un SINR mayor que el umbral que se sitúa para WiMAX en 6.4dB en todo el rango del sector. Además, se puede concluir que existe una notable mejora ante el uso de 4 o 6 bandas de frecuencia respecto el uso de 2 bandas de frecuencia.

La elección entre los diferentes casos dependerá de cada implementación, teniendo un compromiso entre la exactitud que requiera, y el presupuesto que se tenga. Se tiene que tener en cuenta el coste del espectro, ya que a mayor número de bandas de frecuencia, mayor será el coste por la compra de espectro de frecuencia para tener la licencia sobre él.

Por otra parte, se ha podido ver como la variación de cada parámetro, difiere en cada caso.

Mientras que para el caso de 2 bandas de frecuencia, se puede ver que el efecto de los parámetros de la primera pendiente (s_1 y σ_1) es menor que el efecto de los parámetros de la segunda pendiente (s_2 y σ_2) en el SINR (relación entre la señal útil y el ruido más las interferencias), si se observa los resultados de 4 y 6 bandas de frecuencia, se tiene que el efecto de los parámetros de la primera pendiente (s_1 y σ_1) es mayor para distancias menores de 340m, mientras que los parámetros de la segunda pendiente (s_2 y σ_2) no influyen nada para distancias mayores de 340m. En cambio, si nos fijamos en el otro tramo de las gráficas, para distancias mayores de 300m, la influencia de los parámetros de la segunda pendiente es mayor que los de la primera. Por lo que para estos dos casos, dependiendo del tramo de distancias que estemos observando, la influencia de los parámetros de ambas pendientes varía, mientras que para el caso de 2 bandas de frecuencia, es igual en que tramo de distancias nos situemos.

Por otra parte, un aumento en el parámetro s_1 hace que disminuya el SNR, lo que produce una disminución en el SINR. Esto es debido a que una variación del parámetro s_1 produce una variación de la potencia recibida, pero no varía la potencia del ruido, por lo que se produce una variación en el SNR. De la misma manera, la variación de este parámetro varía proporcionalmente la potencia recibida y la potencia de interferencia, por lo que no se produce una variación en el SIR.

Además, el parámetro s_2 tiene una variación un poco más compleja. En el primer tramo de distancias, el SINR aumenta cuando aumenta s_2 . Esto es debido a que en este tramo se produce un mejor aislamiento por lo que se reduce las interferencias, por lo que un aumento de s_2 produce un aumento en el SIR lo que conlleva a un aumento en el SINR. En cambio, en el segundo tramo de

distancias, aumentan las pérdidas por distancia, por lo que un aumento del s_2 produce una disminución en el SINR. Esto es debido a que un aumento del parámetro s_2 produce una disminución en el SNR (ya que se produce un aumento en las pérdidas), por lo que a su vez se produce una disminución en el SINR.

Si nos fijamos en la variación del parámetro σ_1 tiene una influencia prácticamente nula en el SINR en cualquiera de los casos estudiados. Esto es debido a que a partir de una distancia igual al punto de corte R_b , el parámetro σ_1 no influye en los cálculos, por lo que su variación no influye en el SINR.

En cambio, σ_2 sí que influye en el SINR, ya que un aumento de σ_2 produce un aumento del valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo el SIR se reduce y de la misma manera se produce un descenso en el SINR.

La correlación está determinada por el parámetro C_{do} . Como se ha visto en las gráficas que mostraban la influencia de la variación de este parámetro, un aumento del mismo produce un aumento en el SINR. Esto es debido a que un aumento del C_{do} produce una disminución en el valor esperado y la varianza de la interferencia, por lo que aumenta el SIR y con él el SINR.

Además, se ha podido ver como a medida que aumenta el número de bandas, la influencia del C_{do} es menor. Esto es debido a que al aumentar el número de bandas, disminuyen las interferencias por lo que no influye tanto el SIR y pasa a tener una mayor influencia el SNR, que ante la variación del C_{do} se mantiene constante. Mientras que para el caso de 2 bandas de frecuencia, este parámetro entre sus valores de 0 a 1 puede el SINR en el extremo del rango del sector (1000 metros) en 4dB, para el caso de 4 y 6 bandas tiene una influencia muy pequeña en el SINR.

El caso de la frecuencia, tiene una gran influencia en la distancia máxima para los 3 casos, ya que un aumento de la frecuencia produce un aumento de las pérdidas. Por este motivo, la variación de la frecuencia sí tiene una influencia en el SNR, que debido a que al aumentar la frecuencia se produce un aumento de las pérdidas, se reduce en valor del SNR y por ello también se reduce el valor del SINR. En cambio, la variación de la frecuencia no influye en el SIR, ya que tanto la potencia Recibida como las interferencias varía de la misma manera ante el cambio de la frecuencia, por lo que la relación entre ambas se mantiene constante.

Se ha hecho dos análisis diferentes ante la variación de la frecuencia. Por una parte, se ha fijado la altura a la que se va a situar la antena en la estación base a 10 metros, y se ha visto como

varía el SINR para los diferentes valores de la frecuencia. En este caso se ha visto como, para una distancia mayor a 740 metros (que es el R_b para una frecuencia de 5.5GHz), se tiene que el SINR es el mismo para los diferentes valores de la frecuencia. El otro análisis que se ha realizado es el de fijar la distancia del punto de corte R_b y ver para cada una de las frecuencias a que altura se tendría que situar la antena. Tanto para los valores de frecuencia de 2.5GHz y 3.5GHz, la altura es posible (10 y 7.3 metros respectivamente), pero para el valor de la frecuencia de 5.5GHz se tiene una altura de 4.7 metros, que como se puede observar en las gráficas que muestran este análisis, no se consigue dar en todo el rango del sector un SINR mayor que el umbral, por lo que el caso de 5.5GHz en este análisis no es válido.

Otro parámetro que se ha variado es la distancia que existe entre dos estaciones base contiguas. Al aumentar la distancia que existe entre dos estaciones, se produce un aumento del SIR, ya que la potencia recibida se mantiene constante, en cambio las interferencias disminuyen, por lo que una relación entre ambas que es el SIR aumenta. Este aumento del SIR es lo que produce un aumento en el SINR ante un aumento de R . De la misma manera, la potencia de Ruido se mantiene constante ante una variación de la frecuencia, al igual que la potencia recibida, por lo que el SNR que es la relación entre ambas se mantiene constante.

Además, se puede ver como a medida que se aumenta el número de bandas de frecuencia, la influencia de la variación de R disminuye, ya que a medida que se aumenta el número de bandas, se reduce el valor de las interferencias, por lo que el deja de tener tanta influencia el SIR, y no se produce una influencia grande al variar la distancia que hay entre las estaciones. Como ya vimos en los distintos apartados, para 2 bandas de frecuencia, este parámetro influye de forma mucho mayor en la distancia, pudiendo esta variar hasta 80m de distancia. En cambio, para los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia, no es tan determinante (sobre todo entre los valores de 1000 y 1500 metros) por el motivo anteriormente expuesto.

Por último, se ha realizado un estudio de cómo influye la variación en el SINR de la potencia transmitida. Como es lógico, un aumento de la potencia transmitida varía el SNR, ya que la potencia de ruido se mantiene constante mientras que la potencia recibida aumenta, lo que produce un aumento de la potencia recibida cuando aumenta la potencia transmitida. En cambio, la variación de la potencia transmitida no influye en el SIR, ya que esta variación influye tanto en la potencia recibida como en la potencia de las interferencias, por lo que la relación entre ambas se mantiene constante. Por ello, se dedujo que un aumento en la potencia transmitida, aumenta la potencia recibida y el valor de las interferencias, por lo que se produce un aumento en el SNR lo que produce un aumento en el SINR, mientras que el SIR se mantiene constante. Como se ha podido ver, para los 3 casos analizados, 2, 4 y 6 bandas de frecuencia ambos valores de la potencia

de transmisión 0.5W y 1W son valores posibles ya que nos dan una buena comunicación con un SINR mayor que el umbral para todo el rango del sector.

Además, la potencia de transmisión influye de una manera mayor en el caso de 6 bandas de frecuencia que en los casos de 2 y 4 bandas de frecuencia. Esto es debido a que, en el caso de 4 bandas de frecuencia, la interferencia es mayor que para el caso de 6 bandas de frecuencia en el que la interferencia es menor por lo que se nota más la influencia del ruido. Con ello, en el caso de 6 bandas de frecuencia, el SNR tiene una influencia mayor y por ello, la variación de la potencia de transmisión tiene mayor influencia en el SINR.

Con todo ello, se puede concluir que los 3 casos estudiados 2, 4 y 6 bandas de frecuencia son posibles en una implementación práctica, teniendo una mejora de 4dB en el caso de 4 bandas de frecuencia respecto al caso de 2 bandas de frecuencia, y menos de 1dB de mejora entre los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia.

La máxima distancia para la que se cumple el requisito de SINR mínimo (que para WiMAX es de 6.4dB) para un rango del sector de 1000 metros es de en el caso de 2 bandas de frecuencia de 1340 metros, en el caso de 4 bandas de frecuencia, la máxima distancia a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 1460 metros, y para el caso de 6 bandas de frecuencia, esta distancia máxima es de 1475 metros.

La elección entre los 3 casos dependerá del presupuesto que se tenga y el grado de eficacia que se requiera, ya que el caso de 6 bandas de frecuencia nos da mejores resultados pero con un mayor coste porque se tiene que comprar la licencia del espectro de frecuencia que se utilice, por lo que a mayor número de bandas, mayor será el tamaño del espectro, por lo que mayor será el coste del mismo. Por ello, dependiendo de la situación concreta que nos encontremos, se deberá realizar un compromiso entre la calidad necesaria para la implementación y el presupuesto del que se disponga.

6 Conclusión final y trabajo futuro

En este apartado se van a resumir las diferentes conclusiones que se han sacado a lo largo del desarrollo del PFC para cada una de las tecnologías analizadas.

El primer sistema analizado es el sistema GSM, en el que se tiene que dar cobertura en todo el rango del sector, con un SINR mayor que el umbral de 11dB. Al realizar el análisis de GSM desechamos totalmente el caso de 2 bandas de frecuencia ya que no se puede dar cobertura en todo el rango del sector cumpliendo el requisito de un SINR superior a 11dB. Los otros dos casos, 4 y 6 bandas de frecuencia si son posibles a la hora de una implementación práctica, ya que se ha comprobado que para cualquier valor de los parámetros, se está en las condiciones requeridas para el uso de GSM que es dar en todo el rango del sector, con una Relación Señal a Ruido e Interferencia mayor a la umbral, que se ha situado en 11dB. La máxima distancia para la que se cumple este requisito de SINR mínimo para un rango del sector de 1000 metros es de en el caso de 4 bandas de frecuencia de 1830 metros, y en el caso de 6 bandas de frecuencia, la máxima distancia a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 2250 metros para cumplir este requisito de SINR de 11dB. Dependiendo de si nos encontramos en un entorno rural o urbano, esta distancia variará sus parámetros máximos, ya que habrá que tener en cuenta el número de usuarios posibles. Por ello, se considera el radio máximo antes citado como posible en entornos rurales, siendo para entornos urbanos de entre 1000 y 1500 metros.

En WCDMA, se tiene que el enlace ascendente es el que limita la capacidad en este sistema, ya que para el enlace descendente la capacidad es muy superior a la del enlace ascendente. Por ello, la capacidad de WCDMA teniendo en cuenta las condiciones mostradas en la Tabla 3.1 y con un radio del sector de 1000 metros para todos los sectores, tenemos que la capacidad es de aproximadamente 58 usuarios de voz y 10 de datos (variando en 1 o 2 usuarios para los diferentes valores del control de potencia). Para un radio del sector de 1500 metros, la capacidad disminuye a 54 usuarios de voz y 9 de datos.

Para Infostation, no se habla de capacidad sino de radio de cobertura, al igual que pasaba con GSM. Como ya se vio en el análisis de este sistema, una de sus principales características es que la cobertura es discontinua, es decir, no es necesario dar cobertura en todo el radio del sector, si no únicamente en parte de él. Por ello, el resultado que se ha sacado del análisis es que para casi cualquier valor analizado de los diferentes parámetros que determinan el radio de cobertura, la distancia máxima a la que puede situarse el usuario de la estación base si se requiere de un SINR

umbral de 23.5 dB (con el que soportamos cualquier modulación 64 QAM), es de 300 metros, si se tiene un radio de sector de 1000 metros.

En el caso de WiMAX, también tiene sentido hablar del radio de cobertura, pero al contrario que en el caso de Infostation, la cobertura no puede ser discontinua, ya que al igual que pasa en GSM, se tiene que dar cobertura en todo el rango del sector con un valor de SINR mayor que el umbral, que basándonos en la Tabla 5.2 es de 6.4 dB. Para este valor de SINR, tenemos que los 3 casos estudiados 2, 4 y 6 bandas de frecuencia son posibles en una implementación práctica ya que superamos el nivel de SINR de 6.4dB en todo el rango de cobertura para todos los valores analizados de los diferentes parámetros, teniendo una mejora de 4dB en el caso de 4 bandas de frecuencia respecto al caso de 2 bandas de frecuencia, y menos de 1dB de mejora entre los casos de 4 y 6 bandas de frecuencia. La máxima distancia para la que se cumple el requisito de SINR mínimo (que para WiMAX es de 6.4dB) para un rango del sector de 1000 metros es de en el caso de 2 bandas de frecuencia de 1340 metros, en el caso de 4 bandas de frecuencia, la máxima distancia a la que puede situarse el usuario de la estación base es de 1460 metros, y para el caso de 6 bandas de frecuencia, esta distancia máxima es de 1475 metros. Al igual que pasaba en el caso de GSM, la distancia máxima dependerá de si es un entorno rural o urbano, siendo para este último menor. La elección entre los 3 casos dependerá del presupuesto que se tenga y el grado de eficacia que se requiera, ya que el caso de 6 bandas de frecuencia nos da mejores resultados pero con un mayor coste porque se tiene que comprar la licencia del espectro de frecuencia que se utilice, por lo que a mayor número de bandas, mayor será el tamaño del espectro, por lo que mayor será el coste del mismo.

6.1 Trabajo futuro

Un trabajo futuro sería rehacer el estudio para microceldas en el entorno de los túneles, tanto para coches como para trenes, ya que muchas de las autopistas tienen tramos en los que se pasa por un túnel, y de esta manera quedaría terminado el estudio completo de los sistemas móviles en el entorno de las autopistas.

Publicaciones

- Bazil Taha Ahmed, Esther Pérez Muleiro. **“WiMAX Downlink Performance in Highways Cigar-Shaped Microcells”**, un capítulo del libro **“Highways”**. Publicación de “Nova Science Publishers, Inc”, 23 páginas. Publicación ACEPTADA, previsible para 2010.

Referencias

- [1] Bazil Taha-Ahmed and Miguel Calvo Ramon. “WCDMA Multiservice Uplink Capacity of Highways Cigar- Shaped Microcells”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. Volume 2007, Article ID 84835, 8 pages. DOI: 10.1155/2007/84835, Hindawi Publishing Corporation.
- [2] Bazil Taha-Ahmed and Miguel Calvo Ramón. “Infostation for highway cigar-shaped cells”, Computer communications Journal, Vol.32, p.p 730-735. DOI: 10.1016/j.comcom.2008.11.040, 2009.
- [3] José María Rábanos, “Comunicaciones Móviles”. Editorial Centro de estudios Ramón Areces, S.A.
- [4] Bruno Melis and Giovanni Romano, “UMTS W-CDMA: Evaluation of Radio Performance By Means of Link Level Simulations”. IEEE Personal Communications. Volume 7, Issue 3, Page: 42- 49, June 2000.
- [5] José Javier Solvas Morcillo, “Análisis y Aplicación de Sistemas WiMAX multicelda. Master en Tecnologías y Sistemas de Comunicaciones”. UPM. 27 de Noviembre del 2009.

Bibliografía

- José María Rábanos, “Comunicaciones Móviles”. Editorial Centro de estudios Ramón Areces, S.A.
- José María Rábanos, “Transmisión por radio”. Editorial Centro de estudios Ramón Areces, S.A.
- Jelena Misic and Vojislou B. Misic, “Wireless Personal Area Networks: Performance, interconnections and security with IEEE 802.15.4”. Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing. WILEY.
- Michel Mouly and Marie- Bernardette Pautet, “The GSM System for Mobile Communications”. Cell & Sys.
- F.Pérez Fontán and P. Mariño Espinerira, “Modeling the Wireless Propagation Channel: a simulation approach with Matlab”. Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing. WILEY.
- David Roldán , “Comunicaciones inalámbricas”. Ra-Ma.
- Simon R. Saunders, Alejandro Aragón- Zavala, “Antenas and Propagation for Wireless Communication System”. WILEY.
- Byeong Gi Lee, Sysghyun Choi, “Broadband gíreles access and local networks: Mobile WiMAX and WiFi”. Mobile Communications Series.
- Carlos Crespo Cadenas, “Radiocomunicación”. Pearson Prentice Hall.
- Andrew Richardson, “WCDMA design handbook”. Cambridge.
- Mosa Ali and Abu- Rgheff, “Introduction to CDMA wireless Communications”. Elsevier, AP.
- Zerihun Abate, “Wimax RF: System Engineering”. Mobile Communications Series.
- Coordinador: Miguel Calvo Ramón. Autores: Vicente Burillo Martínez, Leandro de Haro Ariet, José María Rábanos, “Sistemas de Comunicaciones Móviles de 3ª generación IMT-2000 (UMTS)”. Fundación Airtel-Vodafone.
- Harri Holma and Antti Toskola, “WCDMA for UMTS”. WILEY.
- William C.Y.Lee , “Wireless & Cellular Telecom”. McGRAW-HILL.
- Especificaciones IEEE: <http://ieee802.org/16/pubs/80216e.html>
- Especificaciones radio 3GPP: <http://www.3gpp.org>
- <http://observatorio.cnice.mec.es/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=349&mode=thread&order=0&thold=0/>
- H.-S. Cho, M. Y. Chung, S. H. Kang, and D. K. Sung, "Performance analysis of cross- and cigar-shaped urban microcells considering user mobility characteristics," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 49, no. 1, pp. 105-116, 2000.
- S. Min and H. L. Bertoni, "Effect of path loss model on CDMA system design for highway microcells," in Proceedings of the 48th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '98), vol. 2, pp. 1009-1013, Ottawa, Canada, May 1998.
- G. Hernandez-Valdez, F. A. Cruz-Perez, and M. Lara, "Impact of the cell size and the propagation model parameters on the performance of microcellular networks," in Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '00), vol. 1, pp. 292-296, London, UK, September 2000.
- A. M. Viterbi and A. J. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 11, no. 6, pp. 892-900, 1993.
- B. Hashem and E. S. Sousa, "Reverse link capacity and interference statistics of a fixed-step power-controlled DS/CDMA system under slow multipath fading," IEEE Transactions on Communications , vol. 47, no. 12, pp. 1905-1912, 1999.

- M. Zorzi, "On the analytical computation of the interference statistics with applications to the performance evaluation of mobile radio systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 1, pp. 103-109, 1997.
- J. M. Romero-Jerez, C. T  lez-Labao, and A. Díaz-Estrella, "Effect of power control imperfections on the reverse link of cellular CDMA networks under multipath fading," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 61-71, 2004.
- B. Taha-Ahmed, M. C. Ramon, and L. Haro-Ariet, "Capacity and interference statistics of highways W-CDMA cigar-shaped microcells (uplink analysis)," *IEEE Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 172-174, 2002.
- F. A. Cruz-Pérez, D. Lara-Rodríguez, and M. Lara, "Full-and half-square cell plans in urban CDMA microcellular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 3, pp. 502-511, 2003.
- Bazil Taha Ahmed , Miguel Calvo Ramón , Leandro Haro Ariet, W-CDMA Uplink Capacity and Interference Statistics of a Long Tunnel Cigar-shaped Microcells Using the Hybrid Model of Propagation with Imperfect Power Control, *Wireless Personal Communications: An International Journal*, v.31 n.1-2, p.19-31, October 2004 [doi>10.1007/s11277-004-1637-4]
- Bazil Taha-Ahmed , Miguel Calvo-Ramón , Leandro Haro-Ariet, W-CDMA Uplink Practical Capacity and Interference Statistics of Rural Highways Cigar-Shaped Microcells with Imperfect Power Control and Finite Transmitted Power, *Wireless Personal Communications: An International Journal*, v.41 n.1, p.43-55, April 2007 [doi>10.1007/s11277-006-9127-5]
- K. Navaie and A. R. Sharafat, "A framework for UMTS air interface analysis," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 113-129, 2003.
- Frenkiel, Richard H., Badrinath, B.R., Borr  s, Joan and Yates, Roy D., "The infostations challenge: balancing cost and ubiquity in delivering wireless data" *IEEE Personal Communications*. 66-71.
- Joan Borr  s, Roy D. Yates, "Cellular excess capacity for infostations", in: EUNIC 99.
- J. Irvine, D. Pesch, D. Robertson, D. Girma, "Efficient UMTS data service provision using infostations", in: VTC 98, pp. 2199-2123.
- Taha Ahmed, B., Calvo Ramón, M. and Haro Ariet, L., "The performance of W-CDMA highways infostations". *Radioengineering*. v13 i1. 42-44.
- Dave Cavalcanti, Djamel Sadok, Judith Kelner, "Capacity study of one-dimensional mobile infostations network".
- J. Borr  s, Capacity of an Infostation Systems, Ph.D. Thesis, Rutgers University, January 2000.
- W.H. Yuen, R.D. Yates, C.W. Sung, Performance evaluation of highway mobile infostation network, in: *IEEE GLOBECOM 2003 at San Francisco*, December, 2003.
- A. Pair, J. Karedal, N. Czick, H. Hofstetter, C. Dumard, T. Zemen, F. Tufvesson, C.F. Mecklenbrauker, A.F. Molisch, First results from car-to-car and car-to-infrastructure radio channel measurement at 5.2GHz, in: *PIMRC 07*, Athens, Greece, 2007.
- Kosch, T., Adler, C.J., Eichler, S., Schroth, C. and Strassberger, M., The scalability problem of vehicular ad/hoc networks and how to solve it. *IEEE Wireless Communications*. 22-28.
- Seungwook Min, Henry L. Bertoni, Effect of path loss model on CDMA system design for highway microcells, in: *Proceedings of the 48th VTC*, Ottawa, Canada, May 1998, pp 1009-1013.
- Tsai, Ywh-Ren and Chang, Jin-Fu, Feasibility of adding a personal communications network to an existing fixed-service microwave system. *IEEE Transactions on Communication*. v44 i1. 76-83.

Glosario

GSM	Global System for Mobile Communications
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
SINR	Signal Interference Noise Rate
SIR	Signal Interferencie Rate
SNR	Signal Noise Rate
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
CDMA	Code Division Multiple Access
MSC	Mobile Switching Centre
BS	Base Station
PLMN	Public land mobile network
ISDN	Integrated Services Digital Network
RF	Radio Frecuency
LAN	Local Area Network

Anexo: Contenido de la publicación

WiMAX Downlink Performance in Highways Cigar-Shaped Microcells

Bazil Taha Ahmed, and Esther Pérez Muleiro

Universidad Autónoma de Madrid

bazil.taha@uam.es

Abstract: In this work, the performance of WiMAX systems for cigar-shaped microcells at highways is studied. The two-slope propagation loss model is used to calculate the signal to interference plus noise ratio taking into account the expected value and the variance of the interference. A model of ten cigar-shaped microcells is used in the WiMAX performance analysis. The effect of the propagation parameters on the WiMAX performance is studied. It is found that the WiMAX performance at the sector border is affected by the base station transmitted power, base station antenna gain and the three propagation parameters s_1 , s_2 and σ_2 .

Keywords: WiMAX, Cigar-shaped microcell, Cochannel interference.

1- Introduction

Despite the challenges faced when transmitting data through varying wireless channels, broadband metropolitan area wireless systems are becoming a reality, partly thanks to the increasingly sophisticated designs that are being employed. Such designs have been made possible by theoretical advances and also by improvements in technology that have led to faster and cheaper implementations compared to older systems.

The IEEE 802.16e/WiMAX air interface standard is a new standard for broadband wireless communications capable of delivering high speed data using a host of technologies for both fixed and mobile radio systems [1]. Several works dealt with the

capacity of WiMAX systems [2]-[4]. WiMAX coverage in hexagonal macrocells has been studied in [5].

WiMAX, meaning Worldwide Interoperability for Microwave Access, is a telecommunications technology that provides wireless transmission of data using a variety of transmission modes, from point-to-point links to portable internet access. The technology provides up to 75 Mb/s symmetric broadband speed without the need for cables. The technology is based on the IEEE 802.16 standard (also called Broadband Wireless Access). The name "WiMAX" was created by the WiMAX Forum, which was formed in June 2001 to promote conformity and interoperability of the standard. The forum describes WiMAX as "a standards-based technology enabling the delivery of last mile wireless broadband access as an alternative to cable and DSL.

The physical layer in WiMAX uses OFDM for both the uplink (UL) and downlink (DL) with a time division duplex (TDD) frame structure of duration 5ms shared between the UL and DL. Adaptive modulation and coding is used on both the UL and DL in WiMAX. Note this study doesn't take into account the improvement due to hybrid automatic repeat request (H-ARQ).

The conditions that describe the highway cigar-shaped microcells under this study are:

- The number of directional sectors of the cigar-shaped microcell is two and a directional antenna is used in each sector.
- The typical separation between two successive base stations is of the order 2 Km.

The aim of this work is to present for the first time the performance of the WiMAX in highway's cigar shaped microcells.

2- Propagation Model

In [5], it has been shown that the two slope model is the best propagation model that can be used to calculate the propagation loss in highways. Thus, the two-slope propagation model with lognormal shadowing is used in the analysis of the WiMAX performance. The exponent of the propagation is assumed to be s_1 until the break point (at a distance R_b) and then it changes to higher value of s_2 . In this way the path loss between the infostation and the mobile user at a distance r from it is given by:

$$L_p(dB) = L_b + 10s_1 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + L_g + \xi_1 \quad \text{If } r \leq R_b \quad (1)$$

$$L_p(dB) = L_b + 10s_2 \log_{10}\left(\frac{r}{R_b}\right) + L_g + \xi_2 \quad \text{If } r > R_b \quad (2)$$

where L_g is the car window penetration loss, r is the distance between the infostation base and the mobile user, ξ_1 and ξ_2 are Gaussian random variables of zero-mean and a standard deviation of σ_1 and σ_2 respectively representing the shadowing effect (path loss deviation from the average value) and L_b (propagation loss at the break point) is given as:

$$L_b(dB) = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10s_1 \log_{10}(R_b) \quad (3)$$

The break-point distance R_b is given by [7]:

$$R_b \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} \quad (4)$$

where

- h_b is the base station antenna height in m,
- h_m is the mobile antenna height in m,
- λ is the wavelength in m.

Typical values of the above mentioned parameters are:

- $s_1 = 2.0$ to 2.25 ,
- $s_2 = 4.0$ to 5.0 ,
- $\sigma_1 = 2.5$ to 3.5 dB,
- $\sigma_2 = 5.0$ to 7.0 dB,
- $R_b = 340$ m,
- $L_g = 6$ dB.

3- Downlink Interference Analysis

Using the two-slope model of propagation mentioned in Section 2, we will calculate the interference statistics (mean value and variance) to find the WiMAX coverage. Fig. 1 shows the configuration of the 10 base stations model accounted for in the analysis and the radiation diagram of the two antennas used in each base station. The base stations are assumed to be regularly spaced every $2R$. The WiMAX performance will be studied considering the right sector of the base station C1. If the user i is at a distance r_{io} from the

base station under study (C1) and at a distance r_{id} from the interfering base station d as shown in Fig. 2. Then the ratio of the interference signal ratio given by a loss like term $L(r_{id}, r_{io})$ due to the distance only is given as:

- For the impractical case when (r_{id} and $r_{io} \leq R_b$), $L(r_{id}, r_{io})$ is:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_1} \quad (5)$$

- If $r_{id} > R_b$ and $r_{io} \leq R_b$ then $L(r_{id}, r_{io})$ is given as:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{R_b} \right)^{s_1} \left(\frac{R_b}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (6)$$

- If (r_{id} and $r_{io} > R_b$) then $L(r_{id}, r_{io})$ is:

$$L(r_{id}, r_{io}) = \left(\frac{r_{io}}{r_{id}} \right)^{s_2} \quad (7)$$

Now the ratio of the interference signal $L_{shd}(r_{id}, r_{io})$, due to the distance and shadowing is given by:

$$L_{shd}(r_{id}, r_{io}) = 10^{(\xi_{id} - \xi_{io})/10} L(r_{id}, r_{io}) \quad (8)$$

where ξ_{id} and ξ_{io} are given as

- In case of (r_{id} and $r_{io} \leq R_b$), $\xi_{id} = \xi_1$ and $\xi_{io} = \xi_1$.
- If $r_{id} > R_b$ and $r_{io} \leq R_b$ then $\xi_{id} = \xi_2$ and $\xi_{io} = \xi_1$.
- In case of (r_{id} and $r_{io} > R_b$), $\xi_{id} = \xi_2$ and $\xi_{io} = \xi_2$.

The received power P_{rx} of the desired signal of the WiMAX user under study is given by:

$$P_{rx} = P_{tx} 10^{-(L_{or}(dB) - G_{TX}(dB) - G_{RX}(dB))/10} \quad (9)$$

where P_{tx} is the transmitted power of the WiMAX station toward the WiMAX user, L_{or} is the path loss (measured in dB) between the basestation under study and the user at location r , G_{TX} is the base station antenna gain measured in dB and G_{RX} is the mobile antenna gain assumed to be 0 dB.

Equation (9) can be rewritten as:

$$P_{rx} = \kappa P_{tx} \quad (10)$$

where κ is the propagation gain of the desired signal given by:

$$\kappa = 10^{-(L_{or}(dB) - G_{TX}(dB) - G_{RX}(dB))/10} \quad (11)$$

For L_{or} , the effect of both the distance and shadowing are included. For a given confidence α , L_{or} is given as:

$$L_{or} (dB) = L_b + 10s_1 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \sigma_1 Q^{-1}(\alpha) \quad \text{if } r \leq R_b \quad (12)$$

$$L_{or} (dB) = L_b + 10s_2 \log_{10} \left(\frac{r}{R_b} \right) + L_g + \sigma_2 Q^{-1}(\alpha) \quad \text{if } r > R_b \quad (13)$$

where $Q^{-1} ()$ is the inverse of the Gaussian Q function. It has a value of 2.05 for a confidence of 98% while it is 2.34 for a confidence of 99%.

The expected value of the cochannel interference power due to the other N cochannel WiMAX base stations is given by:

$$E[I] = \kappa P_{tx} \sum_{d \in N} e^{(\beta^2 \sigma^2 / 2)} L(r_{id}, r_{io}) Q \left[\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma} \right] \quad (15)$$

where

- $\beta = (\ln 10)/10$,
- σ is standard deviation of $(\xi_{id} - \xi_{io})$.
- Q is the Gaussian Q function given by:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad (16)$$

Now the general value of σ^2 is given as:

- When $(r_{id}$ and $r_{io} \leq R_b)$, $\sigma_{id} = \sigma_1$, also $\sigma_{io} = \sigma_1$ then

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_1^2 \quad (17)$$

where C_{do} is the inter-sites correlation coefficient of the shadowing parameters ξ_{id} and ξ_{io} .

- If $r_{id} > R_b$ and $r_{id} \leq R_b$ then the value of σ^2 is given by

$$\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - C_{do}) \sigma_1 \sigma_2 \quad (18)$$

- When $(r_{id}$ and $r_{io} > R_b)$, $\sigma_{id} = \sigma_2$, also $\sigma_{io} = \sigma_2$ then

$$\sigma^2 = 2(1 - C_{do}) \sigma_2^2 \quad (19)$$

The variance of the cochannel interference power is given by:

$$\text{var}[I] = \kappa^2 P_{tx}^2 \sum_{d \in N} e^{2(\beta^2 \sigma^2)} L(r_{id}, r_{io})^2 \left\{ g \left(\frac{r_{id}}{r_{io}} \right) - f^2 \left(\frac{r_{id}}{r_{io}} \right) \right\} \quad (20)$$

where

$$g \left(\frac{r_{id}}{r_{io}} \right) = Q \left[2\beta\sigma + \frac{10 \log_{10} \{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma} \right] \quad (21)$$

and

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{io}}\right) = Q\left[\beta \sigma + \frac{10 \log_{10} \{L(r_{id}, r_{io})\}}{\sigma}\right] \quad (22)$$

For a given confidence probability α , the average Signal to Interference plus Noise ratio SINR per tone is given by:

$$SINR \approx \frac{\frac{P_{rx}}{N_{tones}}}{\frac{Noise}{N_{tones}} + \frac{Interference}{N_{tones}}} \quad (23)$$

which can be written as:

$$SINR = \frac{P_{rx}}{P_N + E[I] + Q^{-1}(\alpha) \sqrt{\text{var}[I]}} \quad (24)$$

where N_{tones} is the number of WiMAX subcarriers, and P_N is the thermal noise of the entire channel band.

3- Numerical Results

Using the results of Section 3, some numerical results will be given. For our calculations we assume the following values. The inter-sites correlation coefficient $C_{do} = 0.5$, $s_1 = 2$, $s_2 = 4.25$, $\sigma_1 = 3$ dB, $\sigma_2 = 6$ dB, $R_b = 340$ m, $R = 1000$ m, and a confidence of 99% unless other values are mentioned. Also we assume that the base station transmitted power to each one of the two directions of the microcell is 1 W, the mobile receiver noise power P_N is -98 dBm, the directional antenna gain is 10 dB and the frequency of operation is 2.5 GHz. The WiMAX bandwidth is assumed to be 8.75 MHz with 864 used subcarriers [8].

Fig. 3 shows the SINR as a function of the distance between the base station and the WiMAX mobile users for three possible reuse factor. It can be noticed that the SINR is very high for the WiMAX user very near to the base station and it reduces with the increment of the distance. Also it can be noticed that the SINR is almost the same for a reuse factor of 4 and 6 when the distance from the base station is higher than break point distance of 340 m. From this fact it can be concluded that a reuse factor of 4 could be used almost in all cases.

Table 1 shows the modulations schemes considered and the SINR necessary to support them. Each modulation scheme consists of the type of modulation (for example, 64QAM) and the code rate (for example, 3/4).

Fig. 4 shows the modulation scheme order (for a frequency reuse factor of 4) as a function of the distance between the base station and the WiMAX mobile users. It can be noticed that, at a very small distance between the base station and the WiMAX user, the seventh scheme of modulation can be supported. At the sector border, the third modulation scheme can be supported.

Fig. 5 shows the downlink net bit rate as a function of the distance between the base station and the WiMAX mobile users. It can be noticed that, at a very small distance between the base station and the WiMAX user, a net bit rate 22.5 Mbps can be supported. At the sector border, the net bit rate is 7.5 Mbps. We have calculate the net bit rate taking in account the factors that reduce the net bit rate such as the pilot subcarrier, the guard time and the useful downlink time of transmission to the total time of transmission.

Fig. 6 shows the effect of changing of s_1 on the WiMAX performance. It can be noticed that, the increment of s_1 provoke a SINR reduction. This will reduce the maximum distance at which a given modulation scheme can be supported.

Fig. 7 shows the effect of changing of s_2 on the WiMAX performance. It can be noticed that, for a distance higher than the break point distance R_b , the increment of s_2 provoke a SINR reduction. This will reduce the maximum distance at which a given modulation scheme can be supported.

Fig. 8 shows the effect of changing of σ_1 on the WiMAX performance. It can be noticed that, for a distance lower than the break point distance R_b , the increment of σ_1 provoke a SINR reduction. This will not affect the WiMAX performance since that the SINR is higher than the SINR necessary to support the higher modulation scheme.

Fig. 9 shows the effect of changing of σ_2 on the WiMAX performance. It can be noticed that, for a distance higher than the break point distance R_b , the increment of σ_2 gives a rise to a SINR reduction. This will reduce the maximum distance at which a given modulation scheme can be supported.

Fig. 10 shows the effect of changing of C_{do} on the WiMAX performance. It can be noticed that, for a distance higher than the break point distance R_b , the reduction of C_{do} reduces the SINR. This will reduce the maximum distance at which a given modulation

scheme can be supported. This is due to fact that, lower values of C_{do} give higher effect of shadowing reducing the WiMAX SINR.

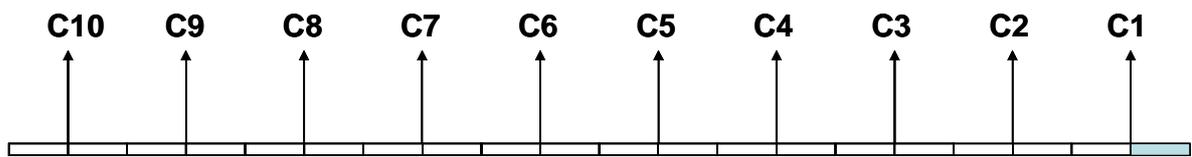
Fig. 11 shows the effect of changing of the sector range R on the WiMAX performance. It can be noticed that, for a sector range of 1500m, we will have a coverage problem at a distance higher than 1450m. Thus, a sector range of the order 1500m is not recommended. The maximum sector range should be 1350m.

Fig. 12 shows the effect of changing of the transmitted power on the WiMAX performance. It can be noticed that, for a lower transmitted power, the SINR will be lower. This will reduce the maximum distance at which a given modulation scheme can be supported.

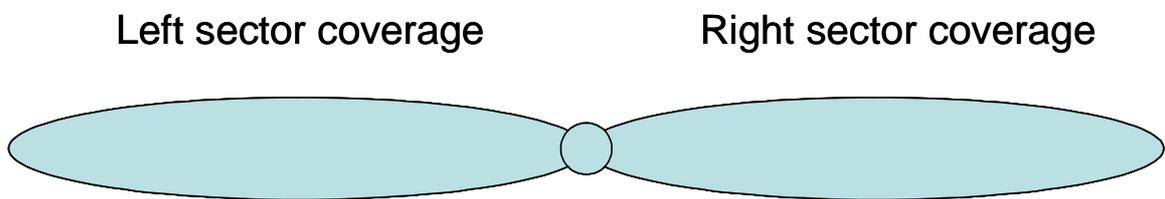
Fig.13 shows the effect of changing the operating frequency on the WiMAX performance marinating the break point distance. It can be noticed that, the increment of the operating frequency provoke SINR reduction. This is due to the fact that increasing the operating frequency will increase the propagation loss reducing the Signal to Noise ratio which will reduce the SINR ratio.

References

- [1] IEEE 802.16e-2005 (amendment to IEEE 802.16 and corrigendum 1). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems.
- [2] R. Srinivasan *et al.*, “Downlink spectral efficiency of mobile WiMAX,” in *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf.*, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [3] C. Ball *et al.*, “Performance evaluation of IEEE802.16 WiMax with fixed and mobile subscribers in tight reuse,” *Europ. Trans. Telecommun.*, vol. 17, pp. 203-218, 2006.
- [4] F. Wang *et al.*, “IEEE 802.16e system performance: analysis and simulations,” in *Proc. IEEE Int. Sym. on Portable Indoor Mobile Radio Commun.*, Berlin, Germany, Sept. 11-14, 2005.
- [5] Sadia Murawwat and Kazi Ahmed, “Performance Analysis of 3G and WiMAX as Cellular Mobile Technologies”, Second International Conference on Electrical Engineering, Lahore, Pakistan, 25-26 March 2008.
- [6] Seungwook Min and Henry L. Bertoni “ Effect of Path Loss Model on CDMA System Design for Highway Microcells “, 48 th VTC, Ottawa, Canada, pp 1009-1013, May 1998.
- [7] Ywh-Ren Tsai and Jin-Fu Chang, “ Feasibility of Adding a Personal Communications Network to an Existing Fixed-service Microwave System“, IEEE Trans. Com., Vol. 44, No. 1, pp 76-83, Jan. 1996.
- [8] Fa-Long Luo, “Mobile Multimedia Broadcasting Standards”, Springer, 2009.



A



B

Fig. 1: The ten base stations model and the base station antenna radiation diagram.

A- The ten cigar-shaped base stations model.

B- Horizontal radiation diagram of the two directional antennas used in each base station.

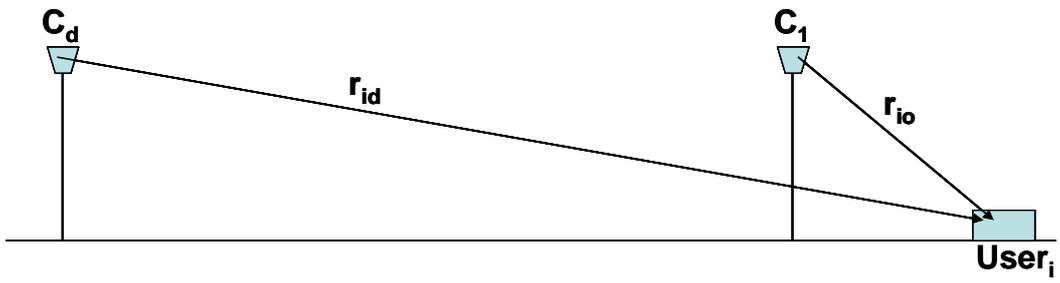


Fig. 2: Schematic diagram of base stations and mobiles for highway microcells scenario.

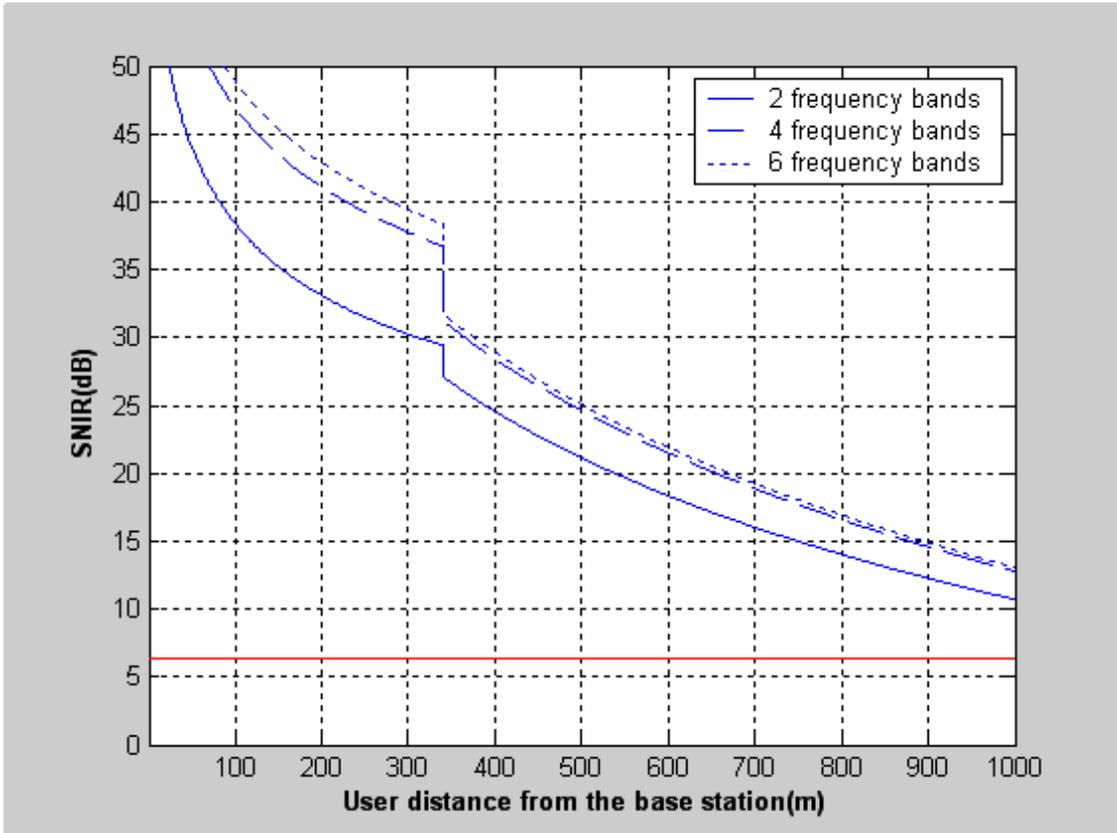


Fig. 3: SINR as a function of the WiMAX user distance from the base station.

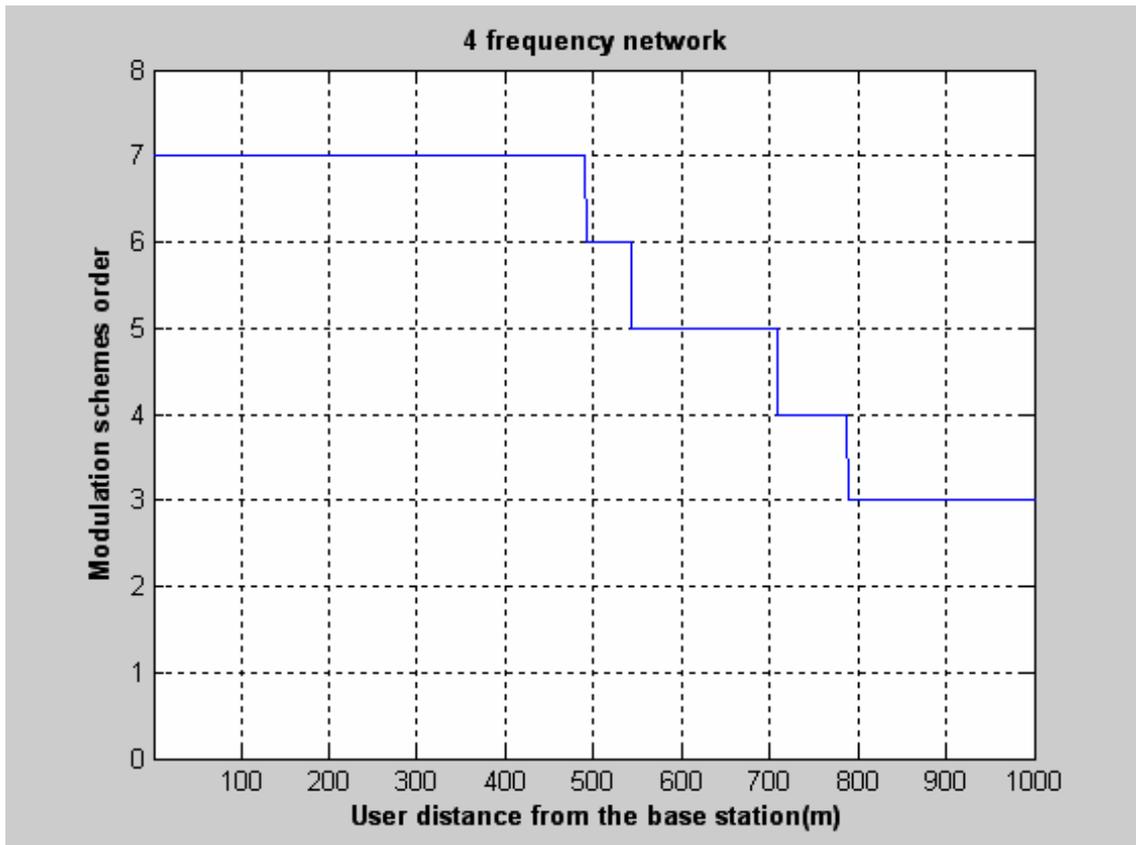


Fig 4: Modulation schemes order as a function of the WiMAX user distance from the base station (reuse factor of 4).

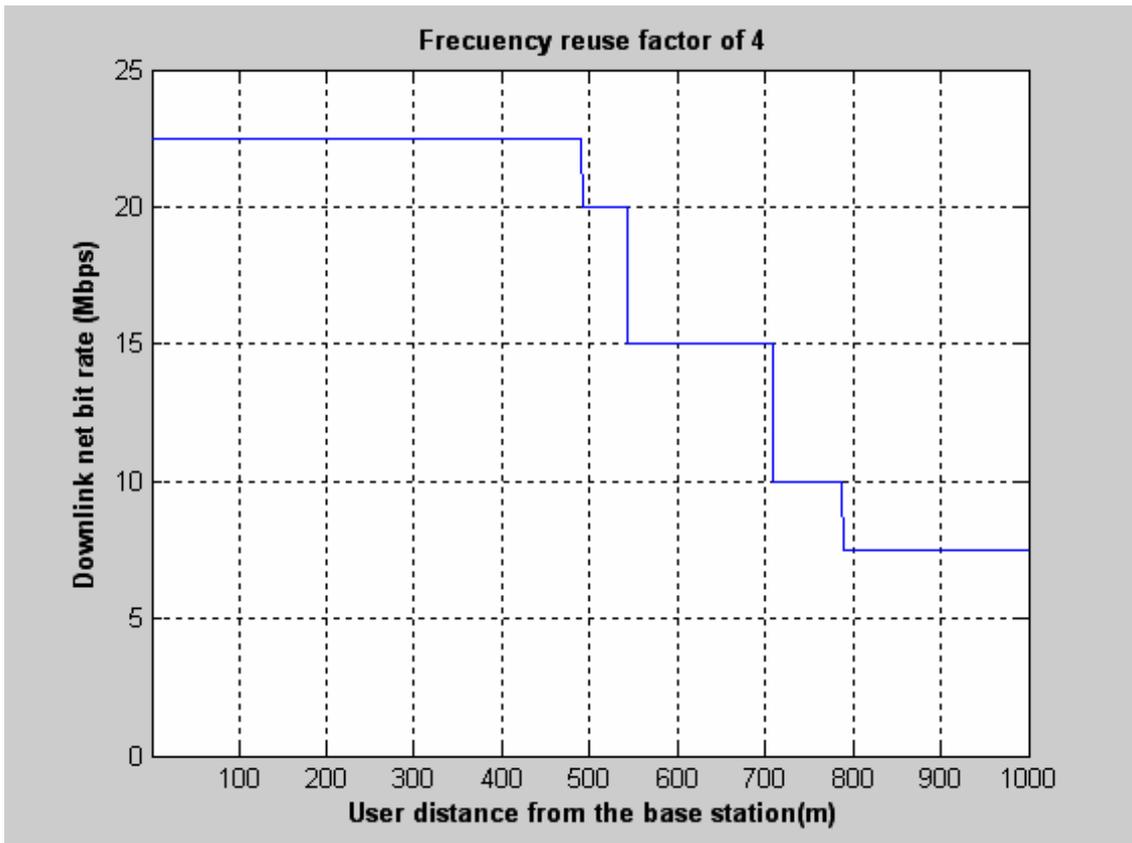


Fig. 5: Net bit rate of WiMAX downlink as a function of the distance from the base station (reuse factor of 4).

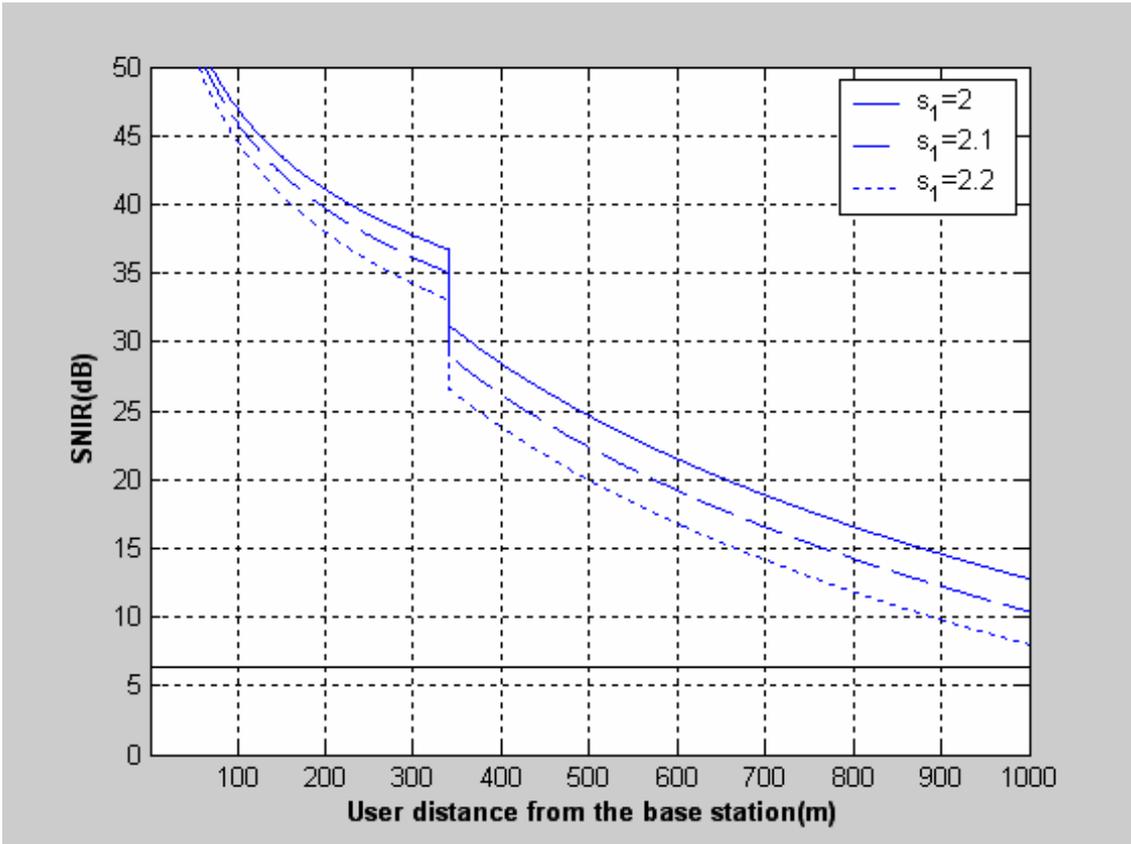


Fig. 6: SINR of the WiMAX user as a function of the distance from the base station for three different values of s_1 (reuse factor of 4).

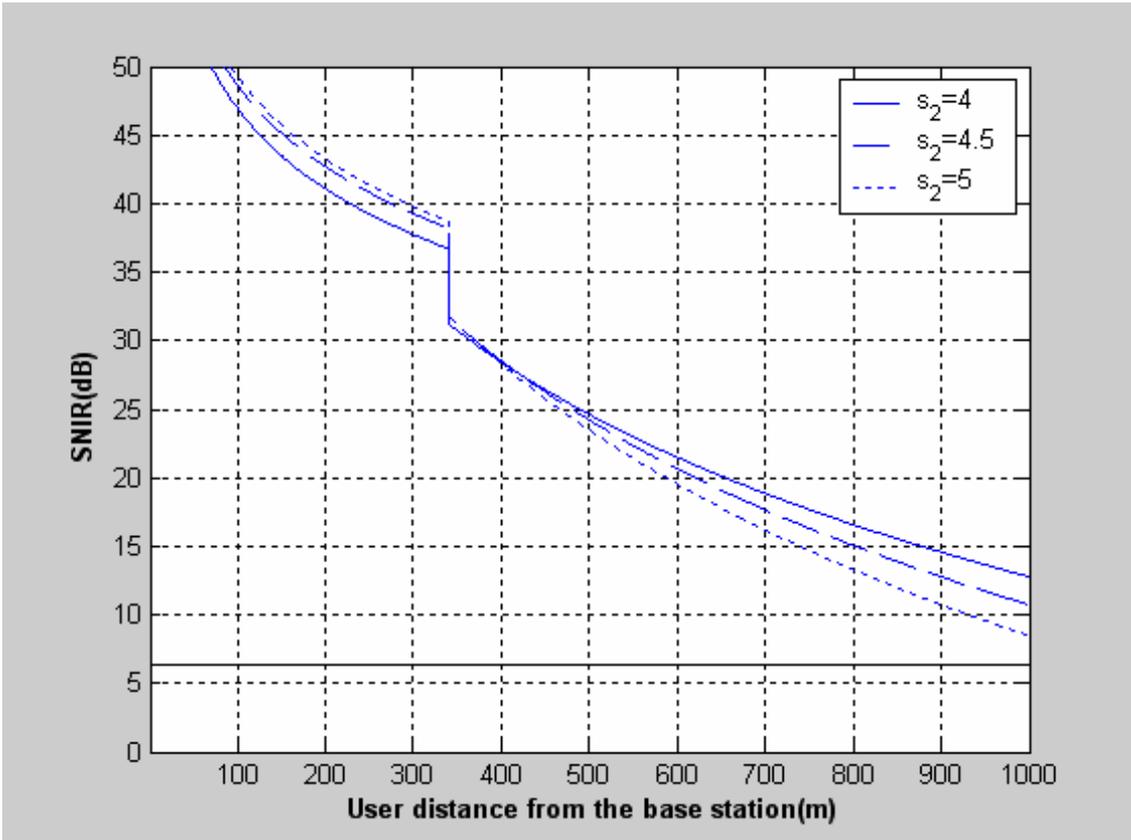


Fig. 7: SINR of the WiMAX user as a function of the distance from the base station for three different values of s_2 (reuse factor of 4).

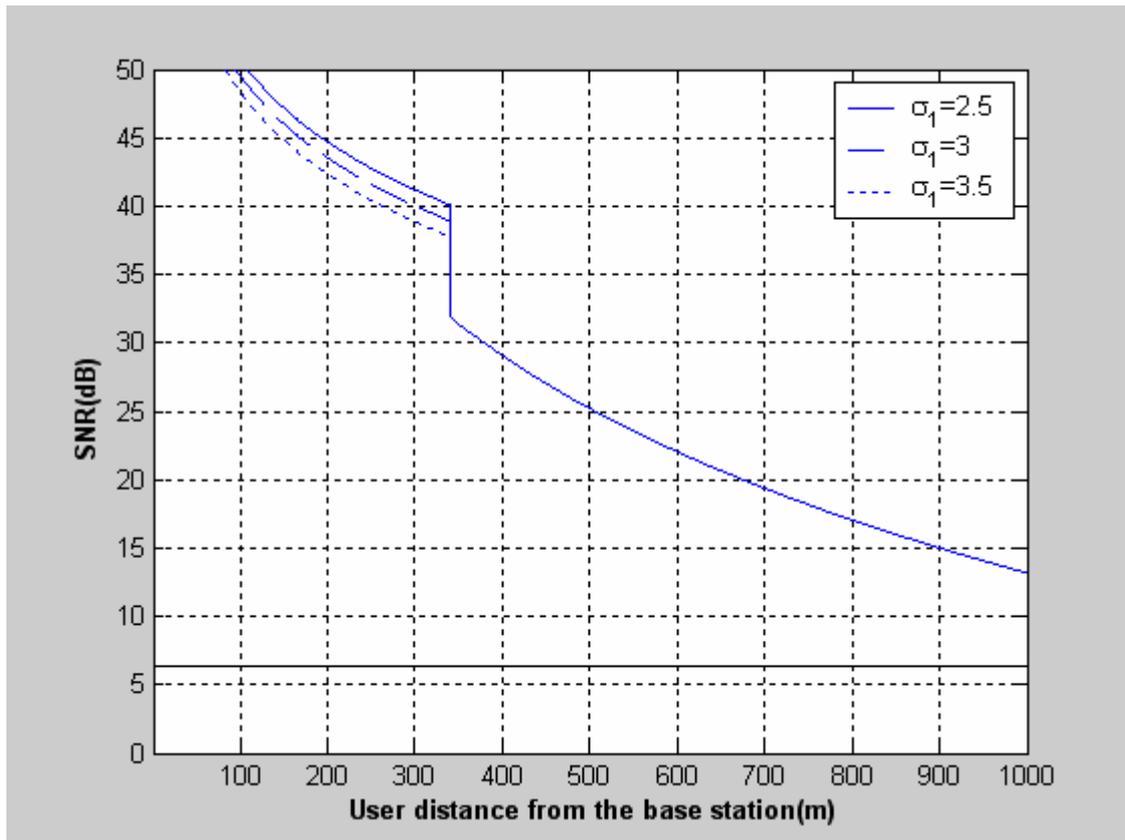


Fig. 8: SINR of the WiMAX user as a function of the distance from the base station for three different values of σ_1 (reuse factor of 4).

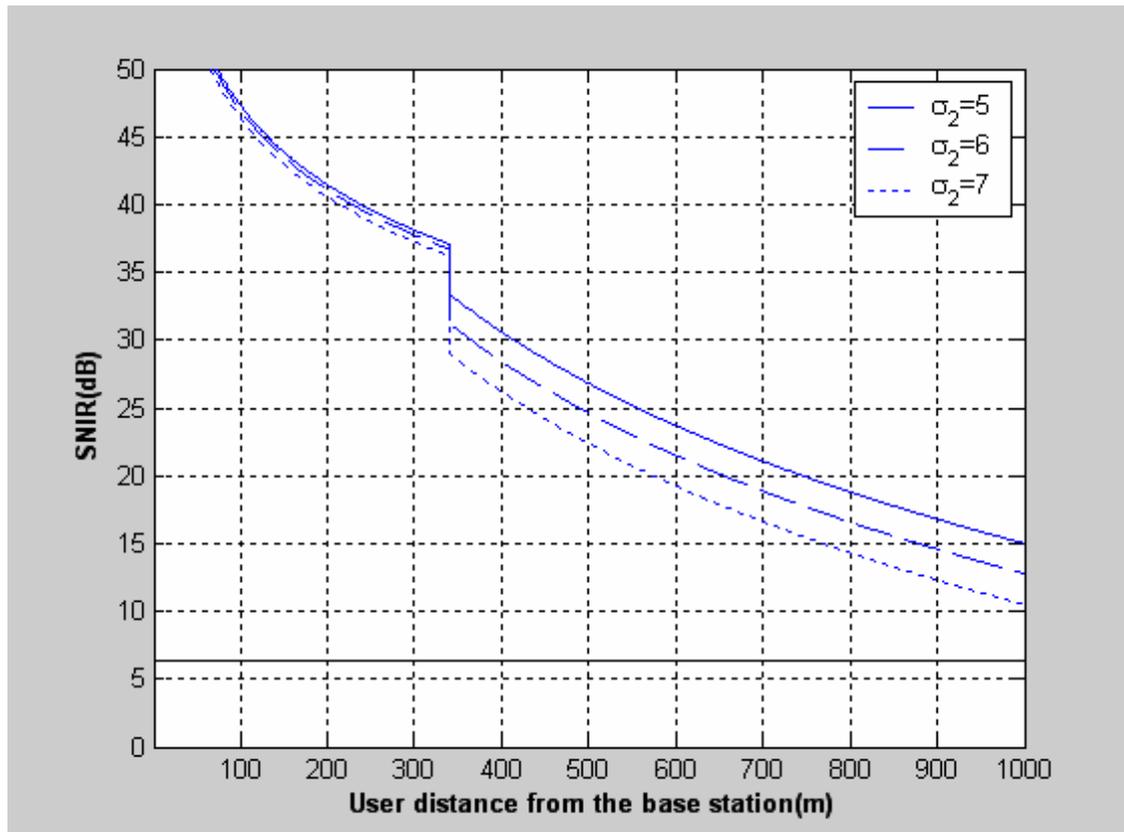


Fig. 9: SINR of the WiMAX user as a function of the distance from the base station for three different values of σ_2 (reuse factor of 4).

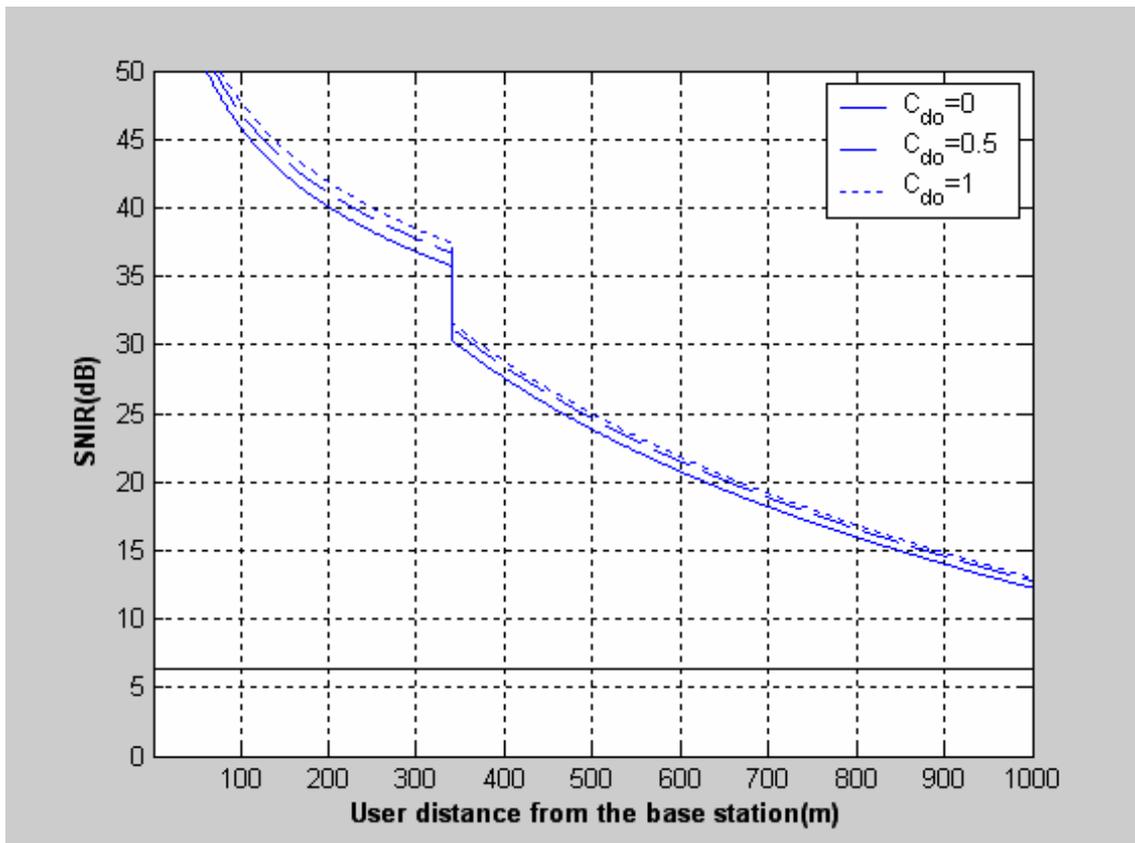


Fig. 10: SINR of the WiMAX user as a function of the distance from the base station for three different values of C_{do} (reuse factor of 4).

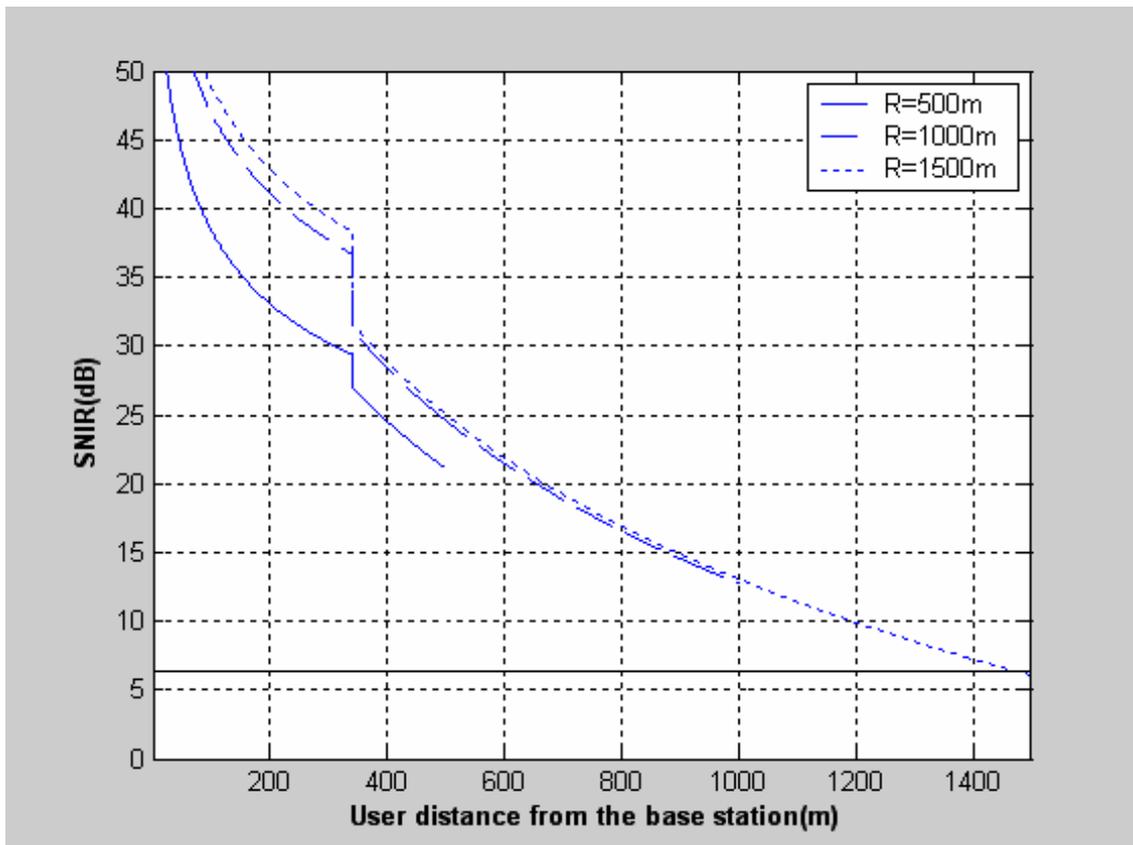


Fig. 11: SINR of the WiMAX user as a function of the distance from the base station for three different values of sector range R (reuse factor of 4).

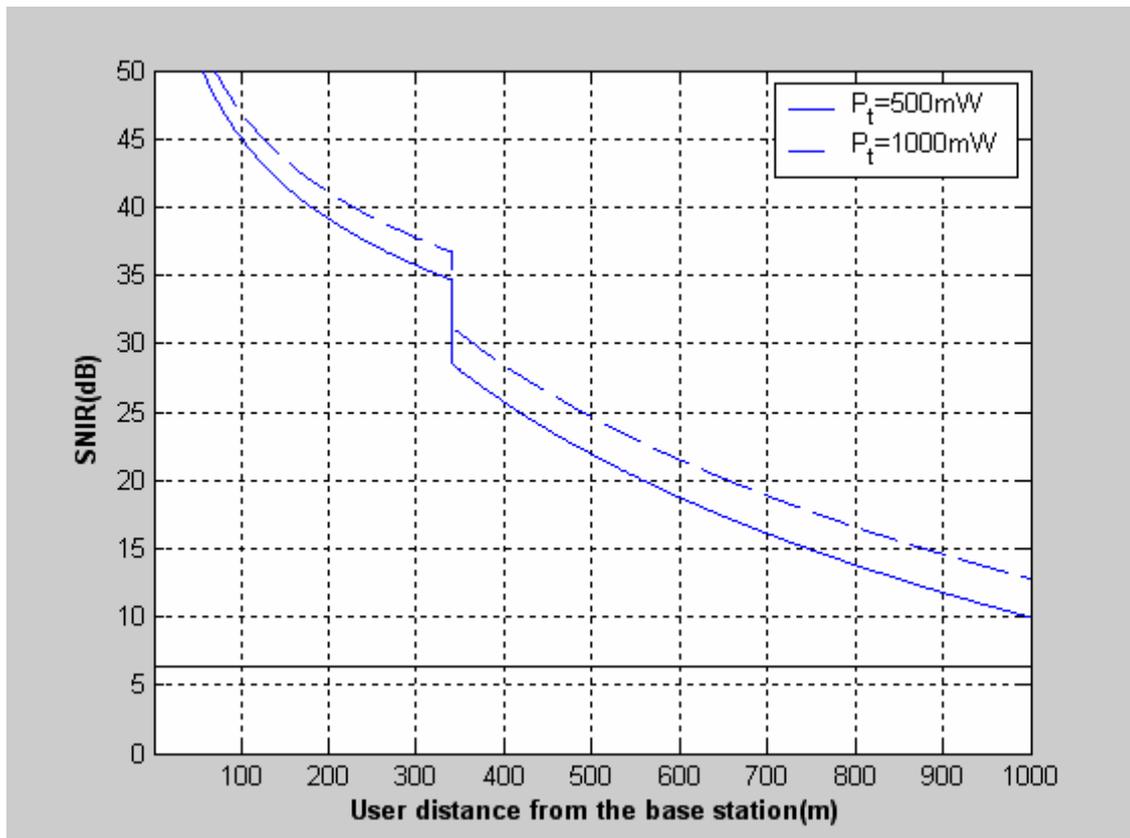


Fig. 12: SINR of the WiMAX user as a function of the distance from the base station for two different values of transmitted power (reuse factor of 4).

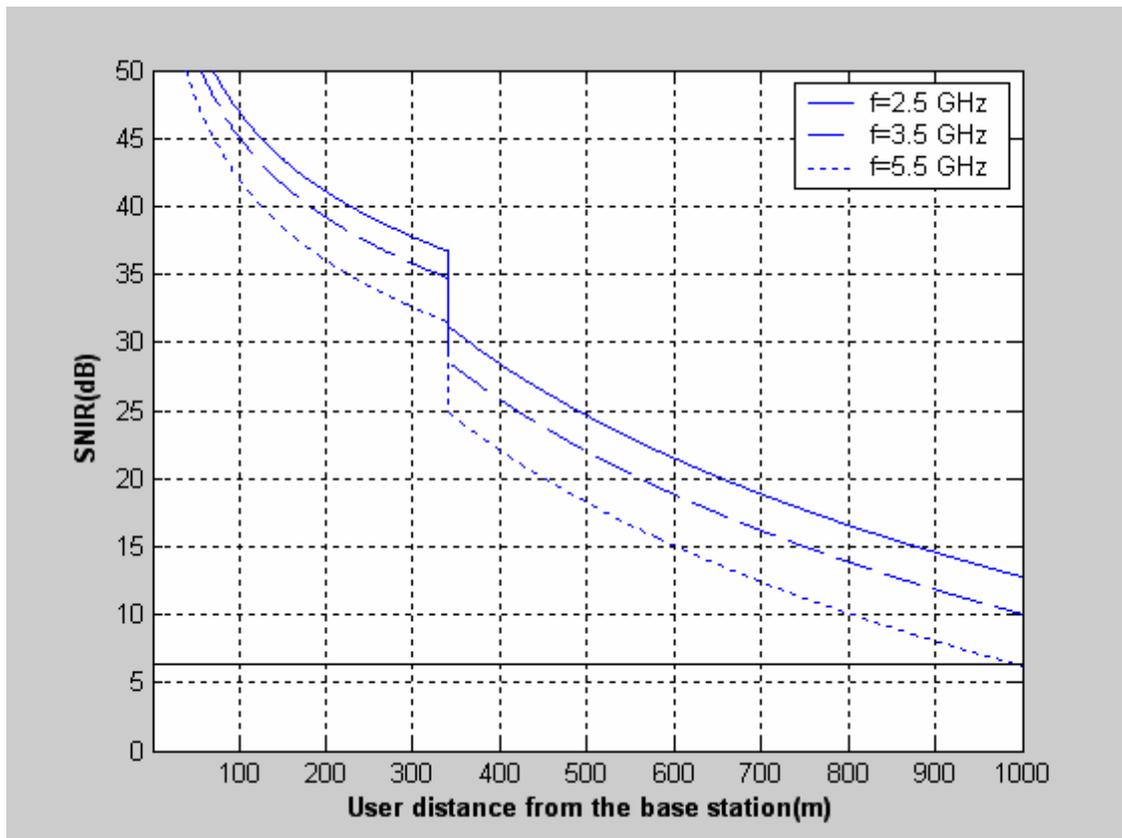


Fig. 13: SINR of the WiMAX user as a function of the distance from the base station for three different values of operating frequency (reuse factor of 4).

Table 1: Modulation schemes and their associated SNIR.

Order	Modulation scheme	SNIR (dB)
0	No service	< 6.4
1	BPSK 1/2	6.4
2	QPSK 1/2	9.4
3	QPSK 3/4	11.2
4	16QAM 1/2	16.4
5	16QAM 3/4	18.2
6	64QAM 2/3	22.7
7	64QAM 3/4	24.4

Presupuesto

El calculo del presupuesto esta realizado en base al coste del material, aplicando a este los gastos generales y beneficio industrial, más la mano de obra utilizada.

1. Ejecución Material	
• Ordenador personal.....	1300 €
• Software.....	700 €
• Impresora láser.....	270 €
• Material de oficina.....	130 €
<hr/>	
Total de ejecución Material.....	2.500 €
2. Gastos generales	
• 16 % sobre Ejecución Material.....	400 €
3. Beneficio Industrial	
• 6 % sobre Ejecución Material.....	150 €
4. Honorarios Proyecto	
• 700 horas a 15 € / hora.....	10500 €
5. Material fungible	
• Gastos de impresión.....	50 €
• Encuadernación.....	50 €
<hr/>	
Total material fungible.....	100 €
6. Subtotal del presupuesto	
• Subtotal Presupuesto.....	13650 €
7. I.V.A. aplicable	
• 16% Subtotal Presupuesto.....	2184 €
8. Total presupuesto	
<hr/>	
Total Presupuesto.....	15834 €

Madrid, Marzo del 2010
El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Esther Pérez Muleiro
Ingeniero Superior de Telecomunicación

Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un estudio sobre la capacidad de los diferentes sistemas de comunicaciones móviles estudiados. 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 esta 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 ordenes 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, quedara el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que este 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 este 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 certificara 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 aplicaran 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 entregara 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, contara con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuara 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 indicara 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 el, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de este, 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 declinara 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 delegara en el las responsabilidades que ostente.