

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA
INTERFERENCIA CO-CANAL EN REDES WIMAX

Autor: **M^a Isabel Durán Vicente**
Tutor: **Ángel M^a Bravo Santos**

INDICE DE CONTENIDOS:

INTRODUCCIÓN

1. DESCRIPCIÓN DE WIMAX

- 1.1. Evolución del estándar
- 1.2. Características Generales
- 1.3. Comparativa con otras tecnologías inalámbricas
- 1.4. Modelos de propagación
 - 1.4.1 Modelos de propagación aplicables a WIMAX
- 1.5. Planificación Celular
- 1.6. Arquitectura/Topologías de WIMAX
- 1.7. Capa física
- 1.8. Capa de acceso al medio (MAC)
- 1.9 Estudio interferencia co-canal
- 1.10 Soluciones NLOS e interferencia co-canal
- 1.11 Aplicaciones
- 1.12 Casos de éxito de despliegue

2. DISEÑO Y SIMULACIONES DE LA INTERFERENCIA CO-CANAL EN WIMAX

- 2.1. Introducción a la simulación
- 2.2. Diseño de la simulación
 - 2.2.1 Transmisor
 - 2.2.1.1 Generador de datos
 - 2.2.1.2 Aleatorización
 - 2.2.1.3 Codificación
 - 2.2.1.4 Interleaving
 - 2.2.1.5 Generador de portadoras

- 2.2.1.6 Modulador
- 2.2.1.7 Prefijo Cíclico

2.2.2 Canal

- 2.2.2.1 Modelo Tipo A
- 2.2.2.2 Modelo Tipo B
- 2.2.2.3 Modelo Tipo C
- 2.2.2.4 Simulación de los canales

2.2.3 Receptor

- 2.2.3.1 Eliminación Prefijo Cíclico y FFT
- 2.2.3.2 Extracción de los datos
- 2.2.3.3 Demodulador
- 2.2.3.4 De-interleaving
- 2.2.3.5 Decodificación
- 2.2.3.6 Aleatorización

2.2.4 Diseño de la interferencia co-canal

- 2.2.4.1 Cálculo de la BER

2.3. Resultados

2.3.1 Simulaciones canal AWGN

- 2.3.1.1 Simulación canal AWGN sin interferencia co-canal
- 2.3.1.2 Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 10%
- 2.3.1.3 Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 50%
- 2.3.1.4 Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 100%

2.3.2 Simulaciones canal SUI-1

- 2.3.2.1 Simulación canal SUI-1 sin interferencia co-canal
- 2.3.2.2 Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 10%
- 2.3.2.3 Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 50%
- 2.3.2.4 Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 100%

2.3.3 Simulaciones canal SUI-2

- 2.3.3.1 Simulación canal SUI-2 sin interferencia co-canal
- 2.3.3.2 Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 10%
- 2.3.3.3 Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 50%

2.3.3.4 Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 100%

2.3.4 Simulaciones canal SUI-3

2.3.4.1 Simulación canal SUI-3 sin interferencia co-canal

2.3.4.2 Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 10%

2.3.4.3 Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 50%

2.3.4.4 Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 100%

2.3.5 Simulaciones canal SUI-4

2.3.5.1 Simulación canal SUI-4 sin interferencia co-canal

2.3.5.2 Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 10%

2.3.5.3 Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 50%

2.3.5.4 Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 100%

2.3.6 Simulaciones canal SUI-5

2.3.6.1 Simulación canal SUI-5 sin interferencia co-canal

2.3.6.2 Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 10%

2.3.6.3 Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 50%

2.3.6.4 Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 100%

2.3.7 Simulaciones canal SUI-6

2.3.7.1 Simulación canal SUI-6 sin interferencia co-canal

2.3.7.2 Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 10%

2.3.7.3 Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 50%

2.3.7.4 Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 100%

2.4. Reglas de planificación

3. CONCLUSIONES

4. LÍNEAS FUTURAS

5. PRESUPUESTO

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Posicionamiento WIMAX entre los estándares inalámbrico
- Figura 2: Zona Fresnel en modelo LOS
- Figura 3: Ejemplo modelo NLOS
- Figura 4: Ubicación dispositivos para NLOS y LOS
- Figura 5: Curvas de Okumura
- Figura 6: Ejemplo células rectangulares con sectores 90°
- Figura 7: Distancia de reutilización
- Figura 8: Topología PMP
- Figura 9: Topología Mallada
- Figura 10: Arquitectura red WIMAX sobre IP
- Figura 11: Torre protocolos WIMAX
- Figura 12: Modos de operación WIMAX
- Figura 13: PDU de MAC
- Figura 14: Modulaciones según distancia a la BS
- Figura 15: Reutilización de frecuencias. Cluster 6 celdas
- Figura 16: Registro de aleatorización
- Figura 17: Generador de código
- Figura 18: Símbolo OFDM
- Figura 19: Registro para modulación de portadoras piloto
- Figura 20: BPSK con codificación Gray
- Figura 21: QPSK con codificación Gray
- Figura 22: Etapas receptor

INDICE DE TABLAS

- Tabla 1: Evolución estándar WIMAX
- Tabla 2: Comparación WIMAX fijo/WIMAX móvil
- Tabla 3: Comparación WIMAX vs WiFi
- Tabla 4: Comparación WIMAX vs otras tecnologías inalámbricas
- Tabla 5: Antena receptora según modelo de propagación
- Tabla 6: C_m para modelo COST 231 Hata
- Tabla 6: Capas radio de la capa física
- Tabla 7: Modulaciones y codificaciones WIMAX
- Tabla 8: Generación de datos
- Tabla 9: Tasas de codificación con configuración 'puncturing'
- Tabla 10: Tamaño bloque para el Bit Interleaver
- Tabla 11: Modelos SUI
- Tabla 12: Modelo SUI-5
- Tabla 13: Modelo SUI-6
- Tabla 14: Modelo SUI-3
- Tabla 15: Modelo SUI-4
- Tabla 16: Modelo SUI-1
- Tabla 17: Modelo SUI-2
- Tabla 18: Resumen relaciones de protección

INDICE DE GRÁFICAS

- Gráfica 1: Simulación canal AWGN sin interferencia co-canal
Gráfica 2: Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 10%
Gráfica 3: Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 50%
Gráfica 4: Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 100%
Gráfica 5: Simulación canal SUI-1 sin interferencia co-canal
Gráfica 6 Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 10%
Gráfica 7: Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 50%
Gráfica 8: Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 100%
Gráfica 9: Simulación canal SUI-2 sin interferencia co-canal
Gráfica 10: Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 10%
Gráfica 11: Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 50%
Gráfica 12: Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 100%
Gráfica 13: Simulación canal SUI-3 sin interferencia co-canal
Gráfica 14: Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 10%
Gráfica 15: Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 50%
Gráfica 16: Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 100%
Gráfica 17: Simulación canal SUI-4 sin interferencia co-canal
Gráfica 18: Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 10%
Gráfica 19: Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 50%
Gráfica 20: Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 100%
Gráfica 21: Simulación canal SUI-5 sin interferencia co-canal
Gráfica 22: Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 10%
Gráfica 23: Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 50%
Gráfica 24: Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 100%
Gráfica 25: Simulación canal SUI-6 sin interferencia co-canal
Gráfica 26 Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 10%
Gráfica 27: Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 50%
Gráfica 28: Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 100%
Gráfica 29: Relación de protección para modelos sin interferencia
Gráfica 30: Relación de protección para modelos con interferencia co-canal al 10%
Gráfica 31: Relación de protección para modelos con interferencia co-canal al 50%

INTRODUCCIÓN

Desde hace algo más de una década, el desarrollo del mundo de las telecomunicaciones se ha orientado al uso intensivo de redes de banda ancha con unos niveles de calidad muy altos, lo cual, ha hecho posible el procesamiento de cualquier tipo de información ya sea voz, video o grandes cantidades de datos en periodos cortos de tiempo.

En los primeros años del desarrollo de este tipo de redes, éstas se diseñaban mediante cableado pudiendo ser, por ejemplo, de fibra óptica o cable coaxial, ya que no había capacidad tecnológica para hacer soluciones inalámbricas a la altura de lo que se exigía. Los cableados, aunque tienen unas prestaciones muy altas a nivel de velocidad o calidad, también presentan inconvenientes, y más si se trata de zonas de difícil acceso. Entre estos inconvenientes está el alto coste de instalación y puesta en servicio, sobre todo en zonas rurales, donde geográficamente es difícil el acceso, o bien donde la densidad de población es baja y las inversiones necesarias para el despliegue tienen una difícil recuperación. Ante estas dificultades tecnológicas y topográficas planteadas, la solución más empleada son las redes inalámbricas, ya que hacen posible un rápido despliegue, presentan menores costes de mantenimiento y operación, además de que son la solución más fácil para zonas donde el cableado tiene un difícil acceso. En concreto, un tipo de redes inalámbricas que solucionan estas situaciones son las redes WIMAX, sobre las cuales se centrará este proyecto.

A parte de la motivación mencionada, otras motivaciones que explican la rápida evolución e implantación que ha tenido WIMAX son:

- Puede funcionar en bandas de frecuencias que hasta ahora no se están utilizando y por lo tanto, están en proceso de ser subastadas. Esta es una gran ventaja ya que en muchos países, otras tecnologías como puede ser 'Universal Mobile Telecommunications System' (UMTS) o 'Long Term Evolution' (LTE), ya tienen sus bandas de frecuencias vendidas [1].
- La arquitectura de red de WIMAX está basada completamente en IP, lo cual simplifica la arquitectura de diseño así como el despliegue y los costes de operación.
- Los equipos WIMAX llevan un tiempo estando disponibles comercialmente, por lo que se hace más fácil su despliegue.

Para situar con claridad dónde se sitúa este estándar respecto al resto de estándares de tecnologías inalámbricas existentes, muestro el siguiente gráfico (Figura 1) creado por la compañía Intel [4]. En dicha figura, se puede ver que WIMAX está diseñado para redes MAN gracias a la cobertura de varios kilómetros que proporciona, mientras que la tecnología Wifi o Bluetooth están diseñados para redes más pequeñas, LAN o PAN respectivamente debido a que la cobertura de éstos solo llega a unos cuantos metros. Esto explica que WIMAX pueda ser una alternativa muy solvente para sitios de difícil acceso donde el cable no llega.

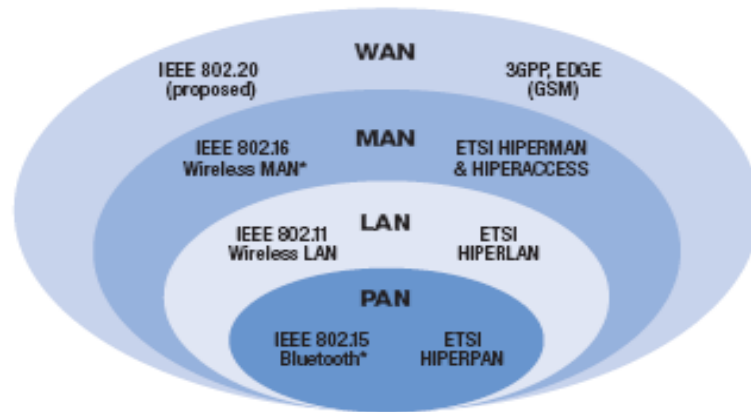


Figura 1: Posicionamiento WIMAX entre los estándares inalámbrico

Hecha esta pequeña introducción sobre el estándar WIMAX, el objetivo principal de este proyecto es estudiar las redes WIMAX para determinar las prestaciones de la red cuando se da una situación en la que existe interferencia co-canal. Este tipo de interferencia, al igual que otras, ocasionará una pérdida de prestaciones que será lo que se evalúe a través de diversas simulaciones en distintos escenarios.

En el primer capítulo se hará una descripción del estándar comentando todos sus aspectos relevantes, poniendo especial énfasis en los puntos que son realmente importantes para el estudio posterior de la interferencia co-canal. Para ello, se explicará la evolución del estándar, se analizará la arquitectura que presenta, la planificación celular, su propagación así como otros temas relacionados.

En el segundo capítulo, con el fin de mostrar cómo se comporta y cómo afecta la interferencia co-canal en las redes WIMAX, se mostrarán las simulaciones hechas por ordenador sobre distintos escenarios. Para ello, habrá que hacer un diseño de la topología sobre la que se harán las simulaciones, así como de su planificación celular entre otros parámetros. Además, se proporcionarán unas reglas de planificación basadas en los resultados obtenidos en las simulaciones.

En el tercer y último capítulo, se extraerán una serie de conclusiones sobre cómo afecta este tipo de interferencia a las prestaciones de la red, y qué soluciones son posibles para combatirla o para hacer que afecte lo menos posible. Además, se darán algunas pinceladas sobre posibles trabajos futuros en esta línea de investigación.

1. DESCRIPCIÓN DE WIMAX

1.1 Evolución del estándar

El acrónimo WIMAX viene de las siglas ‘Worldwide Interoperability for Microwave Access’ cuyo significado es “Interoperabilidad mundial para acceso por microondas”. Es una norma de transmisión de datos en banda ancha que utiliza las ondas radios para su propagación. El estándar que define esta tecnología es el IEEE 802.16 [9]

En relación con esta tecnología, se tiene que mencionar a los dos organismos encargados de él, el ‘Institute of Electrical and Electronics Engineers’ (IEEE) [28] y el consorcio de empresas sin ánimo de lucro WIMAX Forum [29]. Esta segunda organización está compuesta por más de 400 empresas (incluyendo a proveedores de servicios, proveedores de contenido, vendedores de equipos, proveedores de chips...) y son los encargados de promover y certificar la interoperabilidad de los productos inalámbricos de banda ancha del estándar, teniendo como objetivo principal acelerar las implementaciones a nivel mundial, así como expandir el mercado de soluciones de acceso inalámbrico.

La tecnología WIMAX, como se ha mencionado, permite el uso de servicios inalámbricos de banda ancha para usuarios fijos o móviles en áreas metropolitanas y se convirtió en una realidad en el año 2006, cuando Korea Telecom comenzó el despliegue en el área metropolitana de Seúl de una versión del servicio móvil de WIMAX, en los 2.3 GHz, llamado WiBro (este sistema WiBro no es de interés en este proyecto por lo que únicamente se comentará que se trata de un sistema de banda ancha inalámbrica desarrollado por la industria coreana, el cual, fue incorporado en la especificación IEEE802.16e de WIMAX). A partir de la prueba en Seúl, se abrió un amplio campo de investigación y desarrollo fruto de lo cual, durante estos años, se han ido haciendo mejoras en distintos aspectos con el fin de mejorar las prestaciones de WIMAX [2].

La creación de WIMAX a nivel teórico surge algunos años antes, concretamente en el año 1998 de la mano del grupo de trabajo 802.16 del IEEE. Después de años de trabajo, en el año 2002, el IEEE 802.16 fue publicado como un estándar con capacidad de operar en la banda de frecuencias de los 10-66 GHz con línea de visión directa para aplicaciones de acceso fijo. La primera mejora al estándar surgió en 2003, tan solo un año después de su publicación, y consistía en la introducción de una única portadora, el uso de OFDM y OFDMA para accesos fijos pero sin visión directa para frecuencias de 2-11 GHz. A esta versión del estándar se la denominó IEEE 802.16a. Posteriormente ha habido numerosas mejoras que han sido publicadas en diferentes versiones del estándar.

A modo de resumen, muestro a continuación la evolución ocurrida a lo largo de dichas versiones [30] incluyendo posibles versiones que aún están en progreso de desarrollo y no han sido publicadas:

ESTÁNDAR	DESCRIPCIÓN
802.16	Primera versión del estándar completada en 2001. En ella se define un rango de frecuencias que va de los 10GHz hasta los 66GHz para acceso inalámbrico de sistemas fijos. Diseñado para conexiones punto a punto y con línea de visión directa obligatoria.
802.16a	Actualización publicada en 2003. Nuevos rangos de frecuencias de 2 a 11GHz. Incorporación de la capacidad de funcionar sin línea de visión directa (NLOS) y de modo de operación para redes malladas. Permite conexiones fijas punto- punto y punto-multipunto.
802.16c	Actualización encargada principalmente del rango de 10 a 66GHz. Desarrolla posibles perfiles del sistema definiendo características obligatorias para asegurar la interoperabilidad y cuales características son opcionales.
802.16d	Actualización publicada en 2005 también conocida como 802.16-2004 y que supone el reemplazo del estándar 802.16. Define las características más importantes para el acceso fijo de banda ancha inalámbrico. Incorpora tres tipos de modulación para la capa PHY: modulación con una portadora, OFDM de 256 portadoras y OFDM de 2048 portadoras, aunque el usado es OFDM con 256 portadores debido a que presenta menor complejidad a la hora de la sincronización.
802.16e	Actualización publicada en 2005 que provee un soporte específico para el acceso móvil de banda ancha inalámbrico conocido como WIMAX Móvil.
802.16f	Define la base de encaminamiento para conexiones fijas y móviles entre una estación base y los terminales. Se basa en un modelo de gestión de redes que implica la gestión de los nodos, de los flujos de datos y de la calidad de servicio (QoS).
802.16g	Se encarga de la gestión de procedimientos y servicios en el plano de control.
802.16h	Mejora la coexistencia del sistema con bandas de frecuencias con licencia.
802.16i	Provee de herramientas para la administración y control de la información en sistemas móviles.
802.16j	Especificación para la red de transmisión multi-salto.
802.16k	Estudia mecanismos de 'bridging'.

Tabla 1: Evolución estándares WIMAX

1.2 Características Generales

En este apartado, se destacarán los rasgos más importantes de WIMAX, pero antes de detallarlos, cabe explicar que la principal característica del estándar es que engloba dos variantes distintas: WIMAX móvil (802.16e), que es aquel que permite el desplazamiento del usuario de forma similar a la libertad que se consigue con la telefonía móvil, y WIMAX fijo (802.16/802.16a), que es aquel en el que se establece un enlace radio entre la estación base y un equipo de usuario, el cual permanece siempre en el mismo lugar. Para este tipo de entornos, las velocidades teóricas máximas pueden llegar a los 70Mbps con un ancho de banda de 20MHz. En entornos reales, las prestaciones son más bajas a las esperadas, y se han obtenido velocidades de 20Mbps con radios de célula de hasta 6 Km y con un ancho de banda compartido por todos los usuarios de esa célula.

Una vez explicada estas variantes que presenta el estándar, entre sus principales características se encuentran:

- Alta capacidad con más de 70Mbps por canal.
- Gran cobertura puesto que permite conectarse en un diámetro de 80 Km alrededor de la estación base, lo que supone una distancia desde la estación base al equipo usuario de 40 Km.
- Uso de frecuencias de hasta 11GHz para conexiones con visión directa (LOS) y sin visión directa (NLOS); y de entre 10GHz y 66GHz para conexiones LOS.
- Anchos de canal entre 1.5 y 20 MHz. (802.16a)
- Soporta varios cientos de usuarios por canal y debido a su gran ancho de banda es adecuado para tráfico continuo y a ráfagas independientemente del protocolo ya sea IP, ATM, Ethernet... Soporta múltiples servicios simultáneamente (video, voz y datos) ofreciendo calidad de servicio (QoS).
- Soporta redes punto multipunto y redes de malla ('mesh networks') para que los distintos usuarios se puedan comunicar entre sí, sin necesidad de visión directa entre ellos.
- Posee calidad de servicio para situaciones NLOS en las que la señal no se distorsiona gravemente por interferencias o edificios.
- Incorpora soporte para tecnologías de antenas inteligentes ('smart antennas') que mejoran la eficiencia y la cobertura [3].
- En cuanto a seguridad tiene medidas de autenticación de usuarios y encriptación de datos mediante los algoritmos triple DES y RSA.
- Soporta multiplexaciones TDM y FDM.

- Incluye mecanismo de modulación adaptativa, mediante los cuales la estación base y el equipo usuario se conectan utilizando la mejor de las modulaciones posibles en función de las características en ese momento del enlace radio, teniendo en cuenta la relación señal a ruido (SNR) [3].
- Utiliza modulaciones ‘Orthogonal Frequency Division Multiplexing’ (OFDM) y ‘Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access’ (OFDMA) con 256 o 2048 portadoras. Además, incluye la opción de una tercera modulación con una única portadora.
- Uso de la tecnología ‘Multiple-input Multiple-output’ (MIMO) para la mejora de la recepción y de la eficiencia espectral.
- Posee un ajuste dinámico del tamaño del paquete de transmisión.
- Alto consumo de las baterías de los dispositivos
- Necesario limitar la potencia para prevenir interferencias con otros sistemas.

Ahora que las características principales del estándar son conocidas, en la siguiente tabla [3] muestro las diferentes prestaciones que proporciona usar una variante u otra del estándar:

Características	802.16	802.16a	802.16e
Espectro	10-66 GHz	<11 GHz	< 6 GHz
Funcionamiento	LOS	NLOS	NLOS
Tasa de bit	32-134Mbps con canales de 28MHz	Hasta 75Mbps con canales de 20MHz	Hasta 15Mbps con canales de 5MHz
Modulación	QPSK 16QAM 64QAM	OFDM 256 QPSK16 QAM 64QAM	Igual que 802.16a
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Sistema móvil
Anchos de Banda	20 MHz 25 MHz 28 MHz	Seleccionables entre 1,5 y 20MHz	Igual que 802.16a
Radio de célula típico	2-5 Km	5-10 Km	2- 5 Km

Tabla 2: Comparación WIMAX fijo vs WIMAX móvil

1.3 Comparativa con otras tecnologías inalámbricas

Aunque en la actualidad, una de las tecnologías inalámbricas más modernas es WIMAX, existen otras muchas que se siguen usando dependiendo de las prestaciones que exija el diseño de la red o de las capacidades de los dispositivos. Entre todas ellas, la tecnología que más se suele comparar con WIMAX es ‘Wireless Fidelity’ (WiFi), definida en la familia de estándares 802.11 [31]. Esta comparación usual entre ambas, viene dada por el hecho de que durante el desarrollo de WIMAX, se pensó como posible sustituto de la tecnología WiFi, sin embargo, en la actualidad se ha visto que esto no es necesario, puesto que cada una tiene unas prestaciones y es más adecuada o no que la otra dependiendo del ámbito en el que se esté utilizando, por lo que pueden y deben coexistir, ya que se complementan compensando las carencias de una y otra.

Para poder hacer la comparación entre estas dos tecnologías de manera rápida y visualmente clara, muestro a continuación la siguiente tabla (Tabla 3) con las prestaciones más relevantes de cada uno:

Características	WIMAX	WiFi
Familia estándar	802.16	802.11
Ámbito	WMAN	WLAN
Velocidad	70 Mbps	54 Mbps
Frecuencia	2-11 GHz	2.4 GHz (802.11g)
Cobertura	50 Km	30-150 m
Roaming	Si	Si
Ancho de Banda	Flexible (1.5 MHz-20MHz)	20 MHz
QoS	Si	No

Tabla 3: Comparación WIMAX vs WiFi

Como se ha mencionado anteriormente, no existen únicamente estas dos tecnologías inalámbricas, sino que hay muchas más, tales como las redes de telefonía móvil, Bluetooth, Zigbee o ‘Ultrawideband’ (UWB). Quizás de las mencionadas, las más populares son las de telefonía móvil y Bluetooth, ya que son tecnologías que han tenido un rápido y masivo despliegue. En cuanto a las otras dos, Zigbee y UWB, puede que sean menos conocidas por los usuarios, ya que son de más reciente creación y no han tenido el mismo impacto. UWB es una tecnología en el rango de las ‘Wireless Personal Area Network’ (WPAN) que permite la transmisión de paquetes de información muy grandes en unas distancias muy cortas. La especificación Zigbee se basa en la radiodifusión digital de bajo consumo. Su objetivo es maximizar la vida útil de las baterías de los dispositivos, a costa de usar unas tasas de transmisión de datos muy bajas.

Al igual que se ha hecho en el caso anterior, en la siguiente tabla (Tabla 4) muestro las características de cada tecnología con el fin de poder hacer una comparación con WIMAX:

Características	WIMAX	Bluetooth	Zigbee	UWB	Telefonía Móvil
Cobertura	50Km	10 m	300 m	30 m	Global
Frecuencia	2-11 GHz	2.45 GHz	2.4 GHz	3.1- 10.6 GHz	Banda 900 MHz y 1800 MHz
Velocidad	70 Mbps	< 3 Mbps	1.3Mbps	650 Mbps	0.5 Mbps
Ámbito	WMAN	WPAN	WLAN	WPAN	WWAN
Aplicación	Conexiones punto-punto o punto-multipunto	Sustitución del cable en el envío de datos a cortas distancias	Redes de sensores	Sincronización y transmisión de datos de video	Telefonía Móvil

Tabla 4: Comparación WIMAX vs otras tecnologías inalámbricas

1.4 Modelos de propagación

El canal radio en un sistema inalámbrico es descrito a menudo con dos posibles modelos de propagación: LOS o NLOS. El uso de un modelo u otro depende en gran medida de las características que presente el canal radio en ese entorno. Dicho canal radio se caracteriza por las pérdidas de camino, retardo por multicamino, características del desvanecimiento que se puede producir y por las posibles interferencias co-canal. Cabe destacar que estos parámetros son aleatorios y, por ello, sólo se puede hacer una caracterización estadística de ellos.

Un modelo del tipo LOS es aquel que existe visión directa entre la estación base (BS) y el suscriptor (SS). En este tipo de enlaces, se necesita que al menos el 60% de la primera zona de Fresnel esté libre de cualquier tipo de obstáculo u obstrucción para evitar cualquier tipo de difracción en la señal. De esto se deduce que, para diseñar este tipo de enlaces, es necesario conocer tanto la distancia y la altura a la que se encuentran los posibles obstáculos, así como la altura de transmisor y receptor. La siguiente fórmula indica la forma de hallar el radio de esa primera zona de Fresnel mencionada:

$$r_n = 547.723 \sqrt{\frac{n * d_1 * d_2}{f * d}}$$

r_n : radio de la n ésima zona de Fresnel.

d_1 : distancia desde el transmisor al objeto en km.

d_2 : distancia desde el objeto al receptor en km.

d : distancia total del enlace en km.

f : frecuencia en MHz.

Esta situación descrita como modelo LOS, se puede ver en la siguiente figura (Figura 2) [5]:

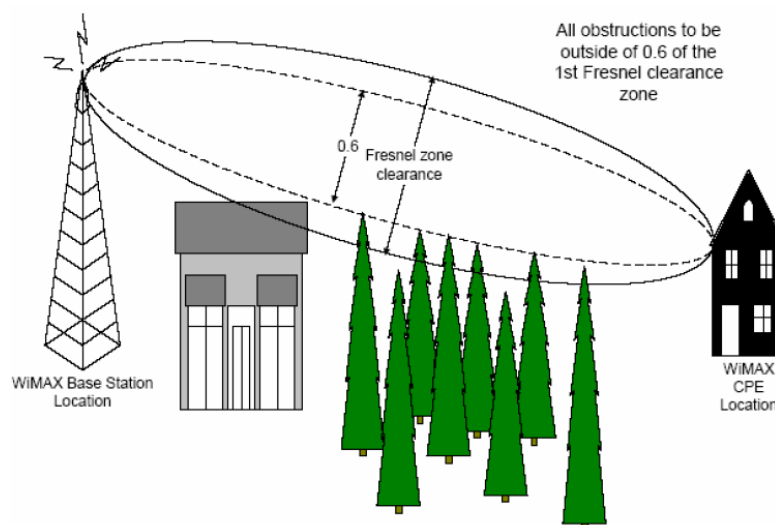


Figura 2: Zona Fresnel en modelo LOS

En cuanto al modelo NLOS, es aquel en el que no existe una línea de visión directa entre la estación base y el suscriptor. En este tipo de enlaces, la señal llega hasta el receptor a través de reflexiones y difracciones producidas por los obstáculos existentes entre transmisor y receptor. La señal que llega al receptor se compone de la señal directa, de múltiples señales reflejadas de menor intensidad; (puesto que al recorrer un camino más largo se van atenuando); y de diferentes caminos de propagación causados por la difracción. Los problemas a resolver en este caso son los diferentes retardos ('delay spread'), polarización, intensidad y estabilidad con los que estas señales se reciben respecto a la señal directa. En la siguiente figura (Figura 3) se muestra un caso de este tipo de enlaces [5]:



Figura 3: Ejemplo modelo NLOS

El fenómeno comentado anteriormente de los caminos múltiples que se producen en el modelo NLOS, puede causar el cambio de la polarización de la señal. Por ello, algunas técnicas usadas para enlaces LOS pueden no funcionar para los enlaces NLOS.

La forma en que los sistemas radio usan estas señales de multicamino como una ventaja, es la llave para proveer servicio en aplicaciones NLOS [5].

Algunas de las ventajas que poseen las aplicaciones NLOS hacen que sean muy útiles en determinadas situaciones:

- En proyectos donde por restricciones con la altura de las antenas no permite un enlace LOS.
- Para despliegues a gran escala, donde la reutilización de frecuencias es crítica, reducir la altura de la antena puede ser una ventaja reduciendo así la interferencia co-canal entre células adyacentes.
- Gracias a las características de WIMAX junto con la tecnología NLOS, permiten utilizar dispositivos cliente 'indoor', es decir, en el interior de edificios. Esto conlleva en primer lugar, superar las pérdidas por penetración en edificios y, en segundo lugar, dar cobertura a distancias razonables con potencias de transmisión y ganancia de la antena reducidas en el lado del abonado.

Además de todo esto, la tecnología NLOS tiene la ventaja de reducir los gastos de instalación del equipamiento del abonado (CPE) y facilitar la ubicación de estos equipos, puesto que esta ubicación es menos estricta que para el modelo LOS. En la siguiente figura (Figura 4) se puede observar este efecto, ya que como se verá posteriormente, usando el enlace LOS se obliga a que el CPE esté situado en el exterior

y con visión a la estación base, mientras que para el sistema NLOS esto no es necesario [5].

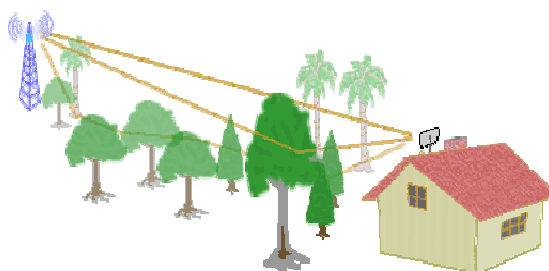


Figura 4: Ubicación dispositivos para NLOS y LOS

Como se ha visto en la figura superior (Figura 4), no es el mismo tipo de instalación ni de antena según se presente un modelo LOS o un modelo NLOS, por ello, para finalizar con este apartado, muestro a continuación los obstáculos que se puede encontrar la señal según el modelo y el tipo de antena más adecuado para cada caso [6]:

	LOS	Casi LOS	NLOS exterior	NLOS interior
Enlace radio	Directo (sin obstáculos)	Directo con un ligero obstáculo (p.e árboles)	Propagación multicamino, con reflexiones	Propagación multicamino, con reflexiones y atenuación por penetración en paredes.
Antena RX	Muy directiva. Instalada en el exterior del edificio	Muy directiva. Instalada en el exterior del edificio	Direccional. Instalada en el exterior del edificio	Omnidireccional. Instalada en dispositivos del cliente en el interior del edificio.

Tabla 5: Antena receptora según modelo de propagación.

1.4.1 Modelos de propagación aplicables a WIMAX

Para realizar un buen diseño de red WIMAX, al igual que ocurre con el resto de tecnologías inalámbricas, es fundamental considerar el radio de cobertura que se quiere conseguir en una comunicación y, para ello, es necesario contar con un buen modelo de predicción que permita calcular con qué pérdidas de potencia se transmitirá una señal en un ambiente determinado.

En la actualidad existen un gran número de modelos de propagación, tanto empíricos como teóricos, pero no todos se ajustan a las características de cada tecnología. En el caso concreto del estándar WIMAX se consideran únicamente modelo empíricos, específicamente elaborados para el estándar con mediciones realizadas en distintos ambientes.

Generalmente se cree que los modelos existentes ofrecen unos resultados similares, sin embargo, en la realidad puede generarse una considerable diferencia en los resultados dependiendo del modelo aplicado, puesto que cada modelo define unas constantes que cambian según las condiciones del terreno en donde se estudia la red, de la altura de las antenas, la distancia entre emisor y receptor, las frecuencias de operación...

Del gran volumen de modelos de propagación existentes, los que mejor se ajustan al estándar WIMAX son:

- Modelo de propagación en Espacio Libre.
- Modelo de propagación Okumura
- Modelo de propagación COST 231 Hata
- Modelo de propagación 'Stanford University Interim' (SUI)
- Modelo de propagación ECC-33

A continuación daré una breve explicación de cada modelo extendiéndome en la sección 2.2.2 en el modelo de propagación SUI, puesto que este modelo es el más comúnmente utilizado en sistemas WIMAX y por este motivo será el que utilice para la realización de las simulaciones.

Modelo de propagación en Espacio Libre

Este modelo de propagación [33] está formado por un conjunto de expresiones matemáticas utilizadas para calcular la propagación de una señal, midiendo la cantidad de fuerza que la señal pierde durante la transmisión entre el emisor y el receptor.

La principal expresión matemática que define este modelo es:

$$L_f(\text{dB}) = 32.45 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f)$$

Donde:

- $L_f(\text{dB})$: pérdida de propagación en espacio libre expresada en dB
- f : frecuencia en MHz
- d : distancia entre transmisor y receptor en Km

Modelo de propagación Okumura

Este modelo [33], desarrollado en medio urbano, se basa en valores medidos y en métodos estadísticos con los cuales se calculó el valor medio del campo de fuerza y algunos factores de corrección como son el grado de urbanización, el grado de irregularidad del terreno, etc..

El rango de frecuencias en el que se puede aplicar va desde los 150 MHz hasta los 1920 MHz, pudiéndose extrapolar a 3 GHz con distancias de 1 a 100 Km, de ahí que pueda ser aplicado en sistemas WIMAX aunque no sea lo habitual debido a dichas restricciones. Otra restricción de este modelo es la altura de la antena de la estación base que debe estar entre los 30 y los 1000 metros.

La expresión matemática que define el modelo es:

$$PL (dB) = L_f + A_{mn}(f, d) - G(h_r) - G_{AREA}$$

Donde:

- PL(dB): pérdida de propagación en dB
- f: frecuencia en MHz
- d: distancia entre el transmisor y el receptor en Km
- h_b: altura antena del transmisor en m
- h_r: altura antena del receptor en m
- L_f: pérdida de propagación en espacio libre expresada en dB
- A_{mn}(f,d): atenuación con relación al espacio libre en dB
- G(h_b): factor de ganancia con relación al transmisor en dB
- G(h_r): factor de ganancia con relación al receptor en dB
- G_{AREA}: ganancia debido al tipo de medio ambiente en dB

Los diversos parámetros que aparecen en la ecuación anterior se calculan o bien con gráficas, o bien con otras expresiones matemáticas. En el caso de G(h_b) y G(h_r), las fórmulas necesarias para hallar su valor son las que se muestran a continuación:

$$G(h_b) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_b}{200} \right), 1000m > h_b > 30m$$

$$G(h_r) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_r}{3} \right), h_r \leq 3m$$

$$G(h_r) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_r}{3} \right), 10m > h_r > 3m$$

Por el contrario, para el caso de hallar el valor de A_{mn} y de G_{AREA} su valor se calcular utilizando las siguientes curvas [33]:

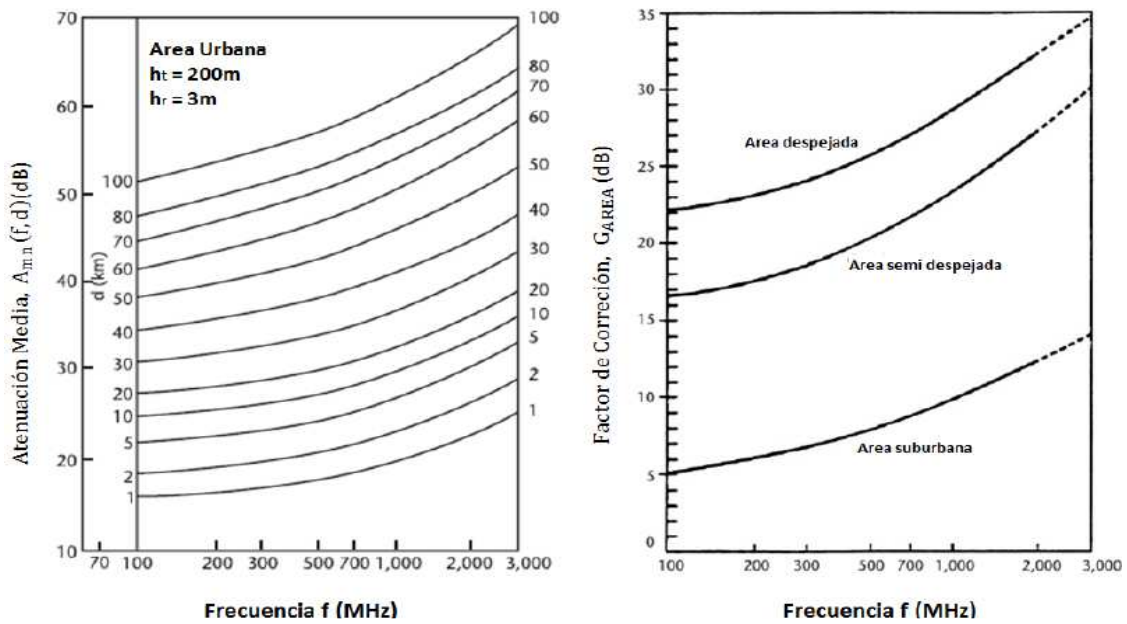


Figura 5: Curvas de Okumura

Modelo de propagación COST 231 Hata

El origen de este modelo fue el obtener una mejor correspondencia con las curvas de Okumura, para así crear un modelo más preciso. La creación de este modelo corrió a cargo de la Cooperación Europea para la Investigación Científica y Técnica (EURO-COST).

Este modelo, al igual que los anteriores, se utiliza para predecir pérdidas por trayectoria en sistemas inalámbricos móviles, aunque también puede ser usado para aplicaciones fijas en la banda de 3,5 GHz. Por este motivo, puede ser utilizado para determinados casos del estándar WIMAX. El rango de frecuencias que maneja está entre los 1500 y los 2000 MHz por lo que, aunque aún puede ser usado para WIMAX, se queda algo escaso.

La ecuación que define el modelo es:

$$PL (dB) = 46.3 + 33.9 \cdot \log_{10}(f) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_b) - ah_m + (44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(h_b)) \cdot \log_{10}(d) + C_m$$

Donde:

PL (dB): pérdida de propagación en dB

f: frecuencia en MHz

d: distancia entre el transmisor y receptor en Km ($1 \text{ Km} < d < 20 \text{ Km}$)

h_b : altura antena del transmisor en m ($30\text{m} < h_b < 200\text{m}$)

C_m : factor de corrección en dB

ah_m : parámetro de corrección

El factor de corrección C_m se define con un número constante de acuerdo al ambiente de propagación en el que se está haciendo la transmisión. El valor de dicho parámetro se puede obtener de la siguiente tabla (Tabla 6) [33]:

Entorno	C_m (db)
Ciudades urbanas densas (edificios altos de más de 7 pisos)	3
Ciudades urbanas medias (edificios más pequeños con calles pequeñas y medianas)	0
Ciudades urbanas medias con calles anchas	-5
Entornos suburbanos con pequeños edificios	-12
Entornos mixtos, pueblo y rural	-20
Entornos rurales con pocos árboles y casi sin colinas	-26

Tabla 6: C_m para modelo COST 231 Hata

En cuanto al parámetro ah_m , su cálculo se realiza mediante las siguientes expresiones matemáticas en función del entorno:

- Entornos urbanos:

$$ah_m = 3.2 \cdot (\log_{10}(11.75 \cdot h_r))^2 - 4.79 \text{ para } f > 400 \text{ MHz}$$

- Áreas suburbanas y rurales:

$$ah_m = (1.11 \cdot \log_{10}f - 0.7) \cdot h_r - (1.5 \cdot \log_{10}f - 0.8)$$

Modelo de propagación SUI

Este modelo fue desarrollado por el Grupo de Trabajo de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha de la IEEE, y se trata de una extensión del modelo Hata con parámetros de corrección para frecuencias superiores a los 1900 MHz. Como ya se mencionó anteriormente, este es el modelo usado habitualmente para sistemas WIMAX dado que el estándar IEEE 802.16 recomienda su uso para la estimación de cobertura [33].

Inicialmente, el modelo solo proponía trabajar en la banda de 1.9 GHz, pero en la actualidad se incluyen parámetros de corrección para extender el uso del modelo a frecuencias en la banda de 3.5 GHz y superiores.

Dado que será el modelo usado para la simulación que realizaré posteriormente, los distintos escenarios que propone este modelo, así como los parámetros que lo definen y otros datos de interés, serán explicados en la sección 2.2.2 de este proyecto.

Modelo de propagación ECC-33

Dado que el modelo original de Okumura no proporcionaba soporte para trabajar con frecuencias superiores a los 3 GHz, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) propuso la extensión de dicho modelo hasta frecuencias de 3.5 GHz y, de ello, surgió este último modelo. Su nombre se debe a que fue desarrollado por el Comité de Comunicación Electrónicas (ECC) [33].

Las ecuaciones que lo definen son:

$$PL (dB) = L_f + A_{bm} - G_b - G_r$$

$$A_{bm} = 20.41 + 9.83 \cdot \log_{10}(d) + 7.894 \cdot \log_{10}(f) + 9.56 \cdot [\log_{10}(f)]^2$$

$$G_b = \log_{10}\left(\frac{h_b}{200}\right) \cdot \{13.958 + 5.8 \cdot [\log_{10}(d)]^2\}$$

$$\text{Para ciudades medianas: } G_r = [42.57 + 13.7 \cdot \log_{10}(f)] \cdot [\log_{10}(h_r) - 0.585]$$

$$\text{Para ciudades grandes: } G_r = 0.759 \cdot h_r - 1.862$$

Donde:

PL(dB): pérdida de propagación en dB

L_f : pérdida de propagación en espacio libre expresada en dB

A_{bm} : pérdida de propagación media

G_b : factor de corrección para la altura de la antena del transmisor en m

G_r : factor de corrección para la altura de la antena del receptor en m

f : frecuencia en GHz

d : distancia entre transmisor y receptor en Km

h_b : altura de la antena del transmisor en m

h_r : altura de la antena del receptor en m.

1.5 Planificación Celular

Una red de banda ancha inalámbrica como WIMAX toma la forma de una red celular, en donde, cada estación base da servicio a un número de suscriptores ubicados en su área de cobertura, la cual está a su vez dividida en células. Independientemente de la ubicación que pueda tener el cliente, ya sea fija o móvil, cada usuario es asignado a una estación base en función de la proximidad que exista a ella. Si esa estación base está muy cercana o la antena del dispositivo de usuario apunta directamente a ella, se percibe una elevada ganancia en esa dirección, lo que provoca la reducción de interferencias y el aumento de los niveles de cobertura en esa dirección.

Como he comentado en el párrafo anterior, el área de cobertura de una estación base está dividida en una serie de células que, dependiendo de su diseño, presentan ciertas ventajas como pueden ser el incremento de capacidad de la red, una mejor cobertura o reducción de la energía. A este proceso de diseño se le conoce con el nombre de planificación celular. Para llevar a cabo esta caracterización, es necesario considerar varios parámetros tales como, las pérdidas por propagación que puedan existir, la zona de servicio (urbana o rural), la dispersión temporal del canal radio o la interferencia co-canal que pueda aparecer.

A modo de ejemplo [7], en la siguiente figura (Figura 6) se muestra una planificación celular sencilla con forma rectangular y sectores de 90° etiquetados como A, B, C y D. Las células con la misma letra indican que esas utilizan el mismo grupo de canales.

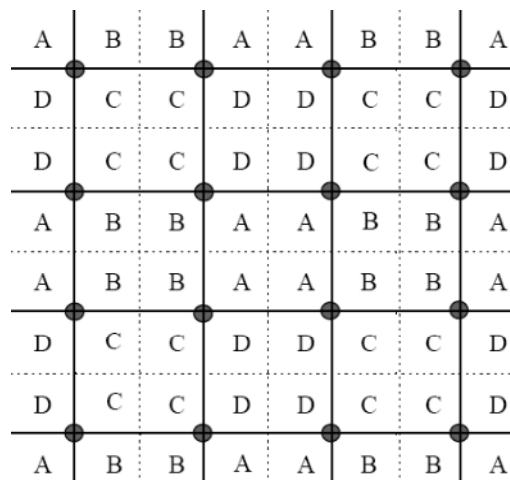


Figura 6: Ejemplo células rectangulares con sectores 90°

Como se observa en la figura superior (Figura 6), ésta es simplemente un ejemplo donde hay muchas células que usan el mismo grupo de canales colocado de forma adyacente lo que ocasionaría una gran interferencia co-canal. El objetivo de la planificación celular es justamente lo contrario, que esas células con el mismo grupo de canales se encuentren lo más separadas posibles, para ello, se usan diversas técnicas que se explicarán más adelante. En cuanto a la geometría de las células, en un sistema WIMAX y en general en sistemas inalámbricos, no se suelen usar células rectangulares sino células con geometría hexagonal, puesto que cubren mejor el área de cobertura. En este tipo de células, los transmisores de las estaciones base se colocan, o en el centro de la célula, o bien en tres de las seis esquinas que posee la célula. Normalmente, si se están

usando antenas omnidireccionales, se suelen colocar en el centro de la célula y las antenas de dirección selectiva (sectorizadas) en las esquinas.

En un sistema WIMAX, la planificación celular es una de las tareas críticas del diseño de la red ya que, modificaciones importantes durante fases sucesivas, pueden derivarse en la necesidad de ajustar directamente cada equipo terminal de usuario, lo que supondría una inversión muy elevada sobre el presupuesto inicial. Para llevar a cabo una buena planificación celular del sistema WIMAX, hay que tener en cuenta los siguientes mecanismos:

- **Reutilización de frecuencias:** permite el uso simultáneo de un mismo canal radio en múltiples transmisores, siempre que éstos estén suficientemente separados para evitar interferencias. La idea básica de este mecanismo, es transmitir los niveles de potencia suficientemente bajos en cada célula para no interferir con la ubicación más cercana en donde se está usando el mismo canal. Este sistema es muy útil ya que permite que un canal pueda ser usado más de una vez en una misma localización. Mientras mayor sea la distancia de reutilización antes mencionada, menor será la probabilidad de que existan interferencias co-canal. En la siguiente figura (Figura 7), muestro un ejemplo donde se explica lo anterior: célula hexagonal con 7 canales en donde viene marcada la distancia de reutilización.

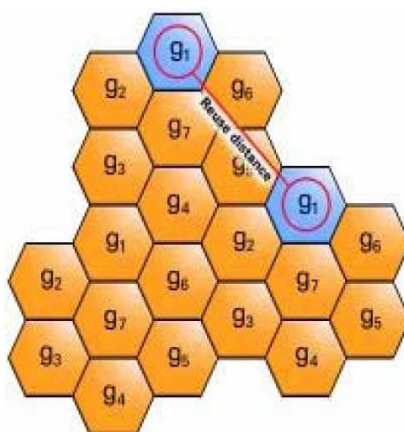


Figura 7: Distancia de reutilización

- **Modulación adaptativa:** el estándar IEEE 802.16 permite adaptar la modulación y la codificación del canal según las condiciones en las que se encuentre el enlace radio en cada momento. Esto hace que la capacidad de la red pueda aumentar haciendo uso de esquemas de modulación de más eficiencia espectral cuando el enlace lo permite, a costa eso sí, de una reducción de la zona de cobertura y unos requisitos de C/I mejores. En este apartado no profundizaré más en el tema puesto que he previsto hacerlo en secciones posteriores.
- **Sectorización:** este mecanismo es clave a la hora de incrementar la capacidad del sistema. Consiste en subdividir cada célula en células más pequeñas llamadas sectores que, en conjunto, proporcionan la misma cobertura pero permiten un mayor número de conexiones, puesto que cada sector es una entidad independiente.

1.6 Arquitectura/Topologías de WIMAX

Antes de empezar con la explicación de las posibles topologías de WIMAX y de su arquitectura, se debe explicar primero qué componentes forman la red. Entre dichos componentes destacan principalmente las estaciones bases y los equipos de usuario.

El equipo de usuario o CPE según la nomenclatura inglesa, es el que incorpora las funciones de suscriptor proporcionando conectividad vía radio con las estaciones base. En cuanto a las estaciones base, realizan las funciones de transmisores proporcionando conectividad a las estaciones clientes, además de mecanismos de control y gestión.

Topologías

En los inicios del estándar, únicamente se contemplaban dos tipos de topología para la red WIMAX: la topología punto a punto y punto a multipunto. Posteriormente, con la actualización del estándar al IEEE 802.16a [32] se añadió la posibilidad de una tercera topología, las redes malladas o 'mesh'. A continuación explico cada una de ellas:

- Punto a punto (PTP): Esta topología se considera una variante de la que define el estándar que es la topología punto a multipunto. Esta distribución se compone únicamente de dos componentes: un transmisor y un receptor.
- Punto a multipunto (PMP): es análoga a la topología usada en las redes de infraestructura Wi-Fi. La estación base (BS) ocupa el rol de punto de acceso y funciona como interfaz entre la red de conexión (Core Network) y la red inalámbrica. Además, tiene como función gestionar el canal y distribuir los recursos disponibles en función de las necesidades de cada usuario. En este tipo de topología, la BS transmite y permite conexión con varios usuarios, los cuales reciben la misma transmisión o partes de la misma, ya que se puede especificar que un SS no reciba partes de la trama. Este tipo de topología permite tres tipos de transmisiones: unicast, multicast y broadcast. Existe la opción de instalar a parte de las BS unas estaciones RS (Repeater Stations) que sirven de repetidores para incrementar la cobertura o porque existan problemas de propagación NLOS.

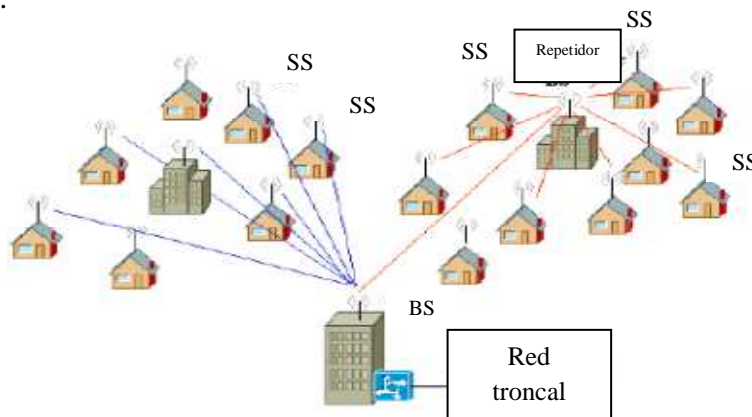


Figura 8: Topología PMP

- **Mallada ('Mesh')**: el estándar, a partir de su versión IEEE 802.16a, especifica este tipo de topología, análoga a la de redes ad hoc. Permite que un SS se pueda conectar a una o más SS intermedias con el fin de alcanzar la BS, por lo que se crea una red multisalto. Se puede decir que cada SS es un nodo de la red y actúan como routers en los que cada nodo envía una señal de baja potencia a sus vecinos, y éstos a su vez, reenvían la señal. Esta posibilidad es muy interesante, ya que permite extender el área total de cobertura de la red sin necesidad de aumentar el número de estaciones base, lo cual representa una reducción muy representativa en los costes de despliegue, puesto que el coste de un SS es muy inferior al de una estación base. Además, este tipo de redes aprenden automáticamente y mantienen configuraciones en caminos dinámicos, por lo que permiten una adaptación rápida a los cambios en la topología, como puede ser añadir o eliminar nodos. Otra ventaja que poseen, es que la gestión de los recursos es distribuida, por lo que todos los nodos deben estar coordinados e informar unos a otros de los recursos disponibles, de las peticiones y de las asignaciones. Un inconveniente asociado a esta última ventaja es que, por razones de compatibilidad en los sistemas de gestión, a menudo es necesario que todos los equipos sean del mismo fabricante.

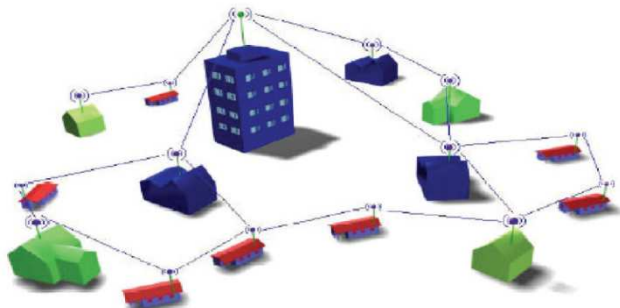


Figura 9: Topología Mallada

Una vez explicados los tipos de topologías que permite WIMAX, la arquitectura de red se basa en tres partes fundamentales:

- Terminales de usuario (ya sean fijos o móviles).
- Red de acceso (ASN): agregación de las entidades funcionales y mensajes de flujo asociados con los servicios de acceso.
- Red del servicio de conectividad (CSN): funciones de red que provee conectividad IP a los usuarios de WIMAX.

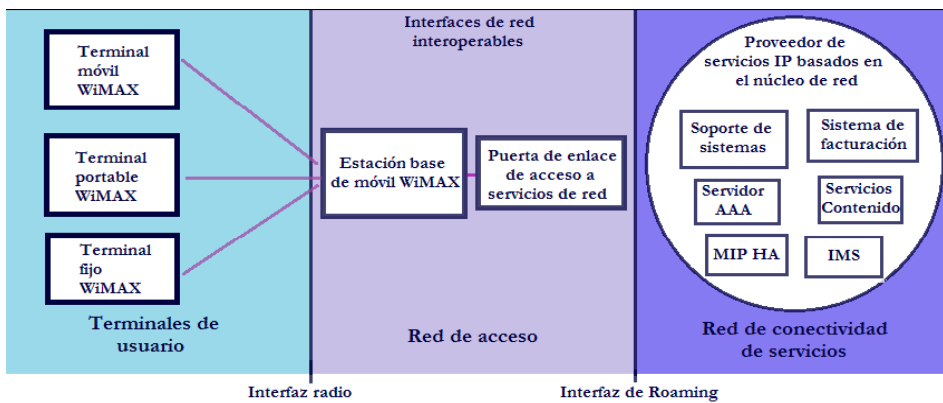


Figura 10: Arquitectura red WIMAX sobre IP

Arquitectura

El estándar WIMAX, al igual que el resto de estándares de la familia IEEE802, define las especificaciones de la capa de acceso al medio (MAC), así como las de las múltiples capas físicas (PHY) del estándar. El estándar WIMAX especifica la siguiente torre de protocolos:

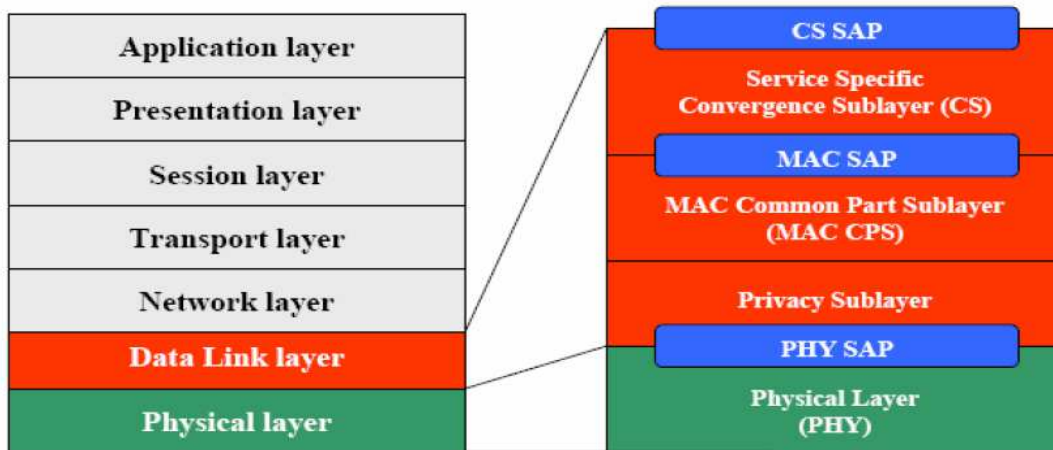


Figura 11: Torre protocolos WIMAX

Como puede verse en la figura anterior, la capa MAC está compuesta por tres subcapas:

- Convergence Sublayer (CS): Soporta la operación con sistemas ATM o IP, por lo que está diseñada para interactuar entre las funciones de la capa MAC y la capa de red.
- Mac Common Part Sublayer (MAC CPS): Es el núcleo de la capa MAC, por lo que contiene todas las funciones necesarias para realizar el intercambio de datos y control.
- Privacy Sublayer: Implementa todos los elementos requeridos para proporcionar privacidad (intercambio de claves, encriptado, desencriptado...) y está interconectada a la capa física.

En cuanto a la capa física (Physical Layer), descrita también en la figura (Figura 11), la analizo en el siguiente apartado con mayor profundidad.

1.7 Capa Física

En cualquier sistema, el modelo OSI ('Open System Interconnection') define la capa física como la encargada de las conexiones físicas tanto guiadas como no guiadas. Para su diseño hay que tener en cuenta las características del medio (conociendo el medio por el que se va a realizar la comunicación, se puede elegir el tipo de cable a usar, el tipo de conectores, tipos de antenas...) y las funciones que realizará para transportar los bits de datos entre los extremos físicos del enlace (sabiendo esto permite la elección del tipo de modulación, de codificación, la tasa de transmisión binaria...). Por tanto, la capa física tiene como principal función transformar una trama de datos proveniente del nivel de enlace en una señal adecuada para transmitirla por el medio físico, utilizando para ello impulsos eléctricos si la conexión es por cable, o electromagnéticos, si se está en un escenario sin cables. Por otro lado, en la recepción de datos, el trabajo es inverso, la capa física se encarga de transformar la señal que recibe en tramas de datos binarios para ser entregados a la capa superior, la de enlace.

Esta comunicación con la capa de enlace, no es más que la comunicación entre la capa física y la llamada capa 'Medium Access Control' (MAC) mediante mensajes, cuyo tamaño máximo, está especificado en la configuración de la interfaz de comunicación entre ambos niveles. Estos mensajes permiten a la capa MAC pasar la información de control y de datos a la capa PHY para ser transmitidos, o bien permiten enviar la información recibida en la capa PHY a la capa MAC. Para ello existen dos canales de transmisión: UP ('Uplink') y DL ('Downlink').

Dado que ambos canales realizan las mismas funciones simplemente que en orden inverso, a continuación se explica únicamente los pasos que sigue el canal de comunicación DL para llevar a cabo de su cometido:

- 1) MAC envía a PHY una descripción de los datos de transmisión proporcionando la información que PHY tiene que codificar o modular para enviarla.
- 2) MAC envía datos de flujo al PHY.
- 3) PHY confirma la recepción de todos los datos y envía a MAC el estado de la transmisión para indicar que está listo para recibir el siguiente paquete de datos.

Todo este proceso que lleva a cabo la capa física puede hacerlo en dos modos de operación distintos: modo 'Frequency Division Duplexing' (FDD) y 'Time Division Duplexing' (TDD). En el primer modo, el FDD, las subráfagas tanto del canal UL como del canal DL se transmiten simultáneamente y sin interferencia gracias a que se transmiten en distintas frecuencias o canales. Por el contrario, en el modo TDD las subráfagas se transmiten de forma consecutiva en distintos slots de tiempo pero sobre el mismo canal. Para sistemas WIMAX pueden usarse 0.5, 1 ó 2 milisegundos como tiempo de ráfaga y las posiciones de DL y UL pueden variar. En la siguiente imagen (Figura 12) se mostrará la forma de transmisión de un modo y otro:

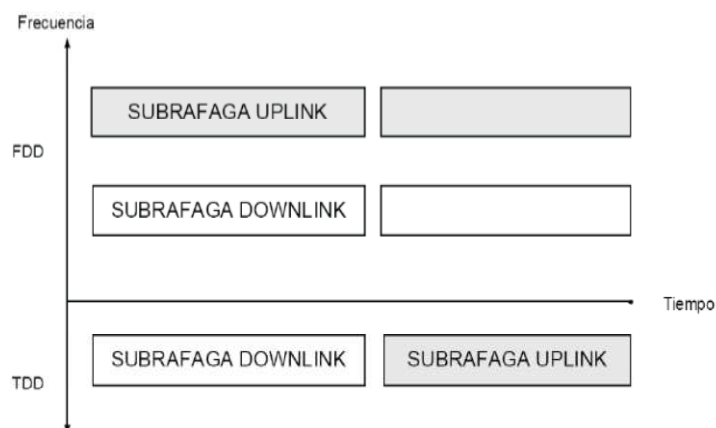


Figura 12: Modos de operación WIMAX

Tanto los conceptos expuestos como los que explicaré a continuación sobre la capa física, son importantes a la hora de entender el trabajo que he realizado, puesto que me ha sido necesario estudiarlos para poder aplicarlos a la programación de la simulación que se explicará en secciones posteriores.

Como se mencionó en la introducción de este apartado, la capa física depende del entorno donde vaya a ser usado el sistema y de la frecuencia que se vaya a utilizar, por ello, existen cinco capas físicas radio dependiendo de estas dos características de diseño:

- **WirelessHUMAN:** HUMAN es el acrónimo de ‘High Speed Unlicensed Metropolitan Area Network’ y como su propio nombre indica es utilizada para funcionar en bandas sin licencia. Especifica la operación en las bandas de 5 a 6 GHz utilizando un esquema flexible de canalización con canales de 10 y 20 MHz separados 5 MHz.
- **WirelessMAN SC:** versión ‘single carrier’ (única portadora) para modelo de línea de visión directa (LOS) en la banda de frecuencias de 10 a 66 GHz. Esta versión está enfocada a aplicaciones con flexibilidad de configuración, puesto que la antena transmisora y receptora deben estar en línea de visión directa, por lo que es recomendable que la antena receptora esté situada en lugares altos. Soporta esquemas de modulación y codificación ajustables individualmente para cada SS en la base de trama por trama.
- **WirelessMAN Sca:** versión ‘single carrier’ para frecuencia inferiores de 11 GHz. Comprende un conjunto de técnicas que le permiten soportar operaciones sin línea de visión directa. Entre estas técnicas se encuentra modulación adaptativa, estimación y ecualización de canal, sistemas de antenas adaptativas, diversidad en transmisión, control de potencia, ARQ (‘Automatic Repeat Request’)...
- **WirelessMAN-OFDM-256 FFT:** Capa pensada para enlaces sin línea de visión directa debido a la simplicidad del proceso de ecualización para señales multiportadora. Uso en bandas de frecuencia inferiores a 11GHz con modulación ortogonal OFDM. Además de las características básicas de la capa WirelessMAN Sca, esta capa soporta topología mallada y subcanalización en el enlace ascendente. De las 256 portadoras que utiliza, 192 son usadas para datos

del usuario, 56 son nulas para formar bandas de guarda y 8 son usadas como símbolos pilotos permanentes.

- **WirelessMAN-OFDMA-2048 FFT:** Capa pensada para enlaces sin línea de visión directa en bandas de frecuencia inferiores a 11 GHz con esquema de múltiple acceso OFDMA. Es una extensión a la técnica OFDM que permite además el uso compartido del canal por múltiples usuario y que, a diferencia de la anterior, ésta soporta subcanalización tantos para el enlace ascendente como descendente.

En la siguiente tabla (Tabla 7) muestro un resumen de las capas explicadas [8] y algunas de sus opciones que aún no se han comentado:

Capa Física	Rango	Opciones	Modulación	Ancho de Banda	Modo duplexado
Wireless HUMAN	2-11 GHz y bandas sin licencia	AAS ARQ STC Mesh	-	-	TDD
WirelessMAN SC	10-66 GHz	-	QPSK 16 QAM 64 QAM	28 MHz	TDD FDD
WirelessMAN Sca	2-11 GHz	AAS ARQ STC	BPSK QPSK 16 QAM 64 QAM 256 QAM	1.75-20 MHz	TDD FDD
WirelessMAN-OFDM	2-11 GHz	AAS ARQ STC Mesh	OFDM QPSK 16 QAM 64 QAM	1.75-20 MHz	TDD FDD
WirelessMAN-OFDMA	2-11 GHz	AAS ARQ STC	OFDMA	1.75-20 MHz	TDD FDD

Tabla 7: Capas radio de la capa física.

Como puede observarse en la tercera columna de la tabla superior, entre las opciones que presentan estas capas, hay tres que cabe destacar, puesto que ayudan a mejorar los efectos producidos por la propagación multicamino:

- **AAS** ('Adaptive Antenna Systems'): uso de múltiples antenas para adaptar el diagrama de radiación hacia una dirección o direcciones deseadas.
- **STC** ('Space Time Coding'): método empleado para mejorar la fiabilidad de la transmisión de datos en sistemas de comunicación inalámbricos que utilizan múltiples antenas de transmisión.

- ARQ('Automatic Repeat-reQuest'): Protocolo de control de errores que retransmite aquellos paquetes que no llegaron al destino correctamente.

En cuanto a las características de la capa física, a continuación destaco las más importantes:

- Los tipos de modulación permitidos para enlace ascendente y descendente son: BPSK, QPSK, QAM y 64-QAM.
- Uso de modulación adaptativa y codificación. Algunas versiones del estándar permiten hasta siete combinaciones de modulación y rangos de codificación que pueden ser usados para alcanzar varios niveles en la tasa de datos y en la robustez de la transmisión, dependiendo, eso sí, de las condiciones del canal de comunicación y de la interferencia existente. Para la codificación utiliza un código concatenado Reed-Solomon (RS) externo con un código convolucional interno, lo cual consigue reducir el efecto de ráfaga de error.
- En relación a la codificación, el estándar permite como característica opcional la codificación Turbo, la cual permite aumentar la cobertura a costa de aumentar la latencia de decodificación y la complejidad.
- Como se ha visto en la descripción de las capas radio, soporta modos TDD, FDD duplex y FDD semi-duplex (H-FDD).
- Posee adaptación a las diferentes regulaciones a nivel mundial.
- Tamaño flexible de canales (3.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz). Proporciona esta flexibilidad para poder operar en diferentes bandas de frecuencias con diferentes requerimientos y variantes del canal en cualquier parte del mundo.
- Soporta sistemas de antenas inteligentes lo que permite gracias a ellas suprimir la interferencia y mejorar la ganancia del sistema.

Llegados a este punto donde se han explicado las distintas capas que existen para el nivel físico y sus características más importantes, otra parte importante para definir la capa física completamente es conocer su entramado. Este entramado es de vital importancia conocerlo a la hora de hacer la programación de la simulación del estándar, puesto que es la base sobre la que se construye el sistema WIMAX. La primera que se estudiará será la trama de bajada y posteriormente se detallará la trama de subida.

La trama de bajada se compone de cinco partes:

- Preámbulo: Es la parte que proporciona sincronización y ecualización al sistema.
- DL/UP Mapping: Indica donde deben recibir o transmitir los SS y con qué modulación hacerlo.

- DIUC ('Downlink Interval Usage Code'): Es el espacio reservado para la transmisión de datos a un SS. Si este campo tiene valor 0 indica que la transmisión es broadcast y está en modo control.
- Datos transmitidos: se deben colocar en orden de robustez decreciente para evitar perder la sincronización.
- TTG ('Transmit/Receive Transition Gap'): Tiempo de guarda necesario para cambiar de modo transmisión a modo recepción sin perder el sincronismo.

La trama de subida se compone de:

- 'Initial Ranging Opportunities': Espacio reservado para peticiones de acceso inicial o para acceso de estaciones que no han resuelto la corrección temporal.
- 'Request Contention Opportunities': Espacio dedicado a peticiones de ancho de transmisión o peticiones de modificación de ancho de banda.
- SSTG ('Subscriber Station Transition Gap'): Campo reservado para la separación de la transmisión de varios suscriptores durante el enlace ascendente. Esta separación ('gap') permite a la BS sincronizarse con un posible nuevo SS.
- UIUC ('Uplink Interval Usage Code'): es el tipo de uso que se le está asignando al canal (solicitud, reservado, mantenimiento...).

1.8 Capa de acceso al medio (MAC)

La capa de control de acceso al medio define dos tipos de accesos: punto a multipunto y topología de red mallada, ambas ya explicadas en anteriores apartados. Esta capa provee un entorno para servicios orientados a conexión creando un flujo para cada conexión. En cada conexión se realizan tres funciones: creación, mantenimiento y terminación. Durante la creación, se asignan los parámetros de calidad de servicio y se negocian otros parámetros también relacionados con la conexión. En el caso del ancho de banda, el ancho de banda inicialmente asignado puede ser modificado durante la fase de mantenimiento debido a las funciones que realizan cada usuario o la red durante esta etapa, es decir, la asignación de ancho de banda se realiza en base a peticiones en tiempo real de los usuarios. Finalmente, las conexiones finalizan cuando se requieren cambios en el servicio al cliente.

Como he mencionado en apartados anteriores, la capa MAC se compone de tres subcapas. La subcapa de convergencia de servicio específico (CS) actúa de salto intermedio para transformar los datos de la red externa, recibidos desde el punto de acceso del servicio (SAP), al servicio de unidades de datos de MAC (SDUs). Una vez hecho eso, se reciben en la subcapa de parte común(CPS) a través de MAC SAP, la cual sirve de enlace entre CS y CPS.

Esta segunda subcapa CPS representa el núcleo de la capa MAC ya que es la encargada de reservar el ancho de banda, establecer el medio para la conexión y mantener esa conexión activa entre los extremos de la comunicación. Por cada una de estas conexiones activas, al iniciar un SS, esta subcapa es la encargada de establecer 3 pares de conexiones de gestión:

- Conexión de gestión básica: envío de mensajes MAC cortos y urgentes relacionados con ARQ, petición de ancho de banda e informe de medidas de canal.
- Conexión de gestión primaria: envío de mensajes largos y más tolerantes al retardo relacionados con el registro de un SS, adición, modificación o terminación de una conexión.
- Conexión de gestión secundaria (opcional): usada para transmitir mensajes tolerantes a retardos basados en estándares como DHCP, TFTP, SMNP...

Los mensajes de gestión deben tener obligatoriamente comprobación de redundancia cíclica (CRC) como protección. Todas las comunicaciones de datos se envían sobre conexiones de transporte en las que nunca se transmitirán mensajes de gestión. Ni servicios portadores ni de datos se enviarán sobre conexiones básicas, primarias o secundarias.

La tercera subcapa llamada capa de seguridad que posee MAC es la que les proporciona privacidad, tanto a los usuarios como a los operadores de telecomunicaciones. Se encarga de la negociación de las capacidades de cifrado, mecanismos de autenticación, intercambio de claves de cifrado y del cifrado de la información.

Al igual que pasaba en la capa física, todos estos conceptos sobre la capa MAC he tenido que estudiarlos (y por ello los expongo en este trabajo) para su posterior

aplicación en la programación de la simulación del estándar WIMAX. Sin estos conceptos básicos, tanto de la capa MAC como de la capa física, no hubiera sido posible realizar la simulación, puesto que como he mencionado, componen la arquitectura base del estándar.

Ahora que se conoce la arquitectura de la capa MAC, a continuación se detalla algunas de las características más importantes que esta capa posee:

- Proporciona cuatro tipos de calidad de servicio: ‘Unsolicited Grant Service’ (UGS), ‘Real-Time Polling Service’ (rtPS), ‘Non-Real-Time Polling Service’ (nrtPS), ‘Best Effort’ (BE). UGS se utiliza en transmisiones de datos en tiempo real con paquetes de longitud fija y transmitidos de forma periódica. El servicio ofrece capacidad fija de transmisión sin necesidad de solicitarlo y el SS no debe utilizar mecanismos de contienda para este tipo de conexión. El modo rtPS se usa para datos en tiempo real con paquetes de longitud variable y transmitidos de forma periódica. El servicio ofrece oportunidades de petición de forma periódica que deben concordar con el ancho de banda especificado y al igual que en el modo anterior, el SS no debe utilizar mecanismos de contienda para este tipo de conexión. El modo nrtPS se aplica para flujos de datos tolerantes al retardo con paquetes de longitud variable que requieren una tasa de datos mínima. El servicio ofrece sondeos a los SS que garantizan la posibilidad de realizar peticiones de ancho de banda incluso cuando el enlace está saturado. A diferencia de los anteriores modos, en este sí se permite que el SS realice peticiones en contienda. Por último, el modo ‘Best Effort’ se utiliza en casos de flujos de datos que no requieren un nivel de servicio mínimo y que pueden ser transmitidos cuando existe ancho de banda disponible. Este servicio solo puede realizar peticiones de ancho de banda bajo contienda.
- Puede coexistir con cualquier protocolo de nivel superior como IPv4, IPv6, VoIP, Ethernet, ATM, LAN Virtual...
- En el caso de WIMAX Móvil, para proporcionar a los usuarios la movilidad que se requiere en esta modalidad, se implementa el protocolo para la transición de una estación base a otra en la capa MAC. Este protocolo se ha diseñado para dar conexión a usuarios móviles a altas velocidades mediante un diseño adecuado de la portadora de referencia o piloto y el ‘Hybrid Automatic Repeat Request’ (HARQ), el cual es un sistema que ayuda a mitigar el efecto de la rápida variación del canal y la fluctuación de la interferencia. Para hacer estos traspasos entre estaciones base, existen tres modalidades: ‘Hard Handoff’ (HHO), ‘Fast base Station Switching’ (FBSS) y ‘Macro Diversity Handover’ (MDHO). HHO es el traspaso común obligatorio en las redes móviles, FBSS es el cambio rápido de estación base haciendo el cambio a la estación base más cercana del conjunto activo, y MDHO es el traspaso por macrodiversidad en el cual el usuario se comunica con todas las estaciones bases del conjunto activo.
- Para conexiones donde se requiere alta fiabilidad soporta peticiones automáticas de retransmisión ARQ. La habilitación de conexiones ARQ requiere que por cada paquete transmitido, se envíe un ‘Acknowledgement’ (ACK) por parte del receptor y si éste no es recibido, el paquete se asumirá como perdido y se retransmitirá.

- En cuanto a seguridad, hace uso del protocolo de privacidad ‘Advanced Encryption Standard’ (AES), el cual es robusto y se basa en administración de llaves. El sistema también ofrece una arquitectura de autenticación flexible basada en ‘Extensible Authentication Protocol’ (EAP), el cual permite autenticación mediante usuario/contraseña o bien mediante certificado digital.
- Acceso al medio controlado por la estación base, es decir, ningún SS puede transmitir sin el permiso de la estación base.
- La transmisión se realiza en tramas de longitud constante perfectamente organizadas por las estación base, por lo que se garantiza la ausencia de colisiones y silencios, proporcionando así la máxima eficiencia.
- Control automático de potencia, lo cual contribuye a la minimización de la interferencia.

Una vez explicadas las características y la arquitectura que presenta la capa MAC, a continuación explicaré la estructura de los paquetes de datos de la capa llamados MAC PDU. El MAC PDU [9] está formado por tres campos, el ‘Generic MAC Header’ cuya longitud es fija, el ‘Payload’ cuya longitud es variable y por último el CRC de uso obligatorio.

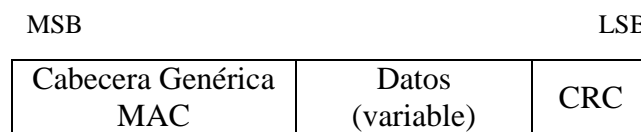


Figura 13: PDU de MAC

En el caso del canal DL, el campo ‘MAC Header’ es un ‘Generic MAC Header’ encargado de iniciar cada MAC PDU, ya sea que contenga mensajes de gestión o de datos de la subcapa de convergencia. Por el contrario, para el canal UL existen dos tipos de UL MAC Header: el ‘Generic MAC Header’ y un ‘MAC Header sin payload’. El primero se usa para mensajes de gestión MAC o datos para la subcapa de convergencia, y el segundo es un tipo de mensaje especial en cual no posee ni campo ‘payload’ ni ‘CRC’.

Aunque no lo he mencionado explícitamente antes, se puede intuir en base a lo explicado, que un paquete MAC PDU puede fragmentarse en varios MAC PDU más pequeños. Esto permite el uso eficiente del ancho de banda disponible, respetando los requerimientos de calidad de servicio de una conexión. En las conexiones en las que no se utiliza ARQ, los fragmentos son transmitidos en secuencia una sola vez, de forma que, en caso de pérdida de alguno de los fragmentos, el MAC PDU completo es descartado. En las conexiones en las que sí se hace uso de ARQ, la fragmentación es opcional, pero en caso de producirse, los fragmentos son formados concatenando grupos de bloques ARQ con números de secuencia adyacentes.

La implementación del mencionado mecanismo de ARQ como parte de la MAC es opcional, y puede activarse independientemente para cada conexión sin mezclar tráfico

no ARQ y ARQ dentro de una misma conexión. La información relativa al 'feedback' de ARQ puede ser enviada como un mensaje de gestión MAC en la conexión de gestión básica, o incluirla dentro de la conexión existente.

Tanto la arquitectura como la estructura de entramado de la capa MAC, están enfocadas a hacer de esta capa una capa lo más eficiente posible, puesto que cuanto mejor aproveche la capa MAC las capacidades que proporciona la capa física, mayor alcance se podrá obtener con el mismo rendimiento. Esta eficiencia se traduce en:

- Ahorro de antenas.
- Ahorro de potencia de transmisión.
- Mayor rendimiento.

1.9 Estudio interferencia co-canal

La interferencia co-canal es aquella que aparece en la antena receptora proveniente de comunicaciones diferentes a la establecida, generadas en celdas distantes y que utilizan la misma frecuencia [14]. Por esto, en la antena receptora se reciben tanto la señal de la comunicación que se tiene establecida, como las señales de otras comunicaciones, provocando así la interferencia.

La interferencia co-canal supone un factor importante a la hora de diseñar un sistema de comunicaciones WIMAX, puesto que impone el número mínimo de celdas por agrupación, lo cual determina el conjunto de celdas entre las que se reparten todos los canales asignados al sistema. Cuando menor es el número de celdas por agrupación, mayor es el número de canales disponibles por celda y por lo tanto, mayor es la capacidad que posee el sistema y menor es la distancia entre celdas co-canal, por lo que existirá mayor interferencia. Por este motivo, el número de celdas por agrupación es una medida básica de la capacidad de un sistema.

Para llevar a cabo un buen diseño del número de celdas por agrupación, es necesario conocer previamente la relación señal a interferencia exigida para una calidad aceptable de la comunicación concreta, ya que este umbral varía de un sistema a otro. Con esta relación señal a interferencia umbral, se marca la distancia mínima que debe existir entre las celdas co-canal y por tanto, el número de celdas de la agrupación.

Con lo explicado hasta ahora sobre la interferencia co-canal, se puede deducir que la interferencia co-canal depende del radio de la celda (R) y de la distancia al centro de la celda co-canal más próxima (D), pero es independiente de la potencia de transmisión si y solo si, ésta se encuentra en los márgenes recomendados, ya que si se aumenta la potencia de transmisión provocará el efecto contrario, incrementará la interferencia co-canal, puesto que también se elevará la potencia de transmisión de estaciones bases interferentes.

Entre los parámetros que hay que tener en cuenta para diseñar el sistema es la relación D/R , ya que incrementando esta relación se incrementa:

- La separación entre celdas co-canales
- El parámetro Q , llamado también factor de reutilización co-canal, el cual está relacionado con el tamaño del cluster representado por N .
- La relación C/I , que no es más que la relación entre la señal y la interferencia existente.

De igual forma que al tener falta de cobertura en determinados sectores, se aplican métodos de cálculo de pérdidas de propagación, en el caso de presentarse problemas de interferencia co-canal, que se observarán en una reducción de la calidad del sistema y de la cobertura del mismo, existen métodos para detectar estos problemas. Entre estos métodos destacaré principalmente dos en este proyecto: búsqueda del área de interferencia desde el equipo de usuario y búsqueda del área de interferencia desde la celda.

La búsqueda del área de interferencia desde el equipo de usuario consiste en medir la interferencia seleccionando cualquier canal (ya que la interferencia puede surgir de un canal o de todos los canales), y haciendo transmitir en el mismo canal en todas las celdas co-canales. Todo esto mientras el equipo de usuario se desplaza dentro de su celda (en caso de WIMAX móvil). Se realiza una comparación del nivel de señal sin la transmisión en las restantes celdas, y a partir de las mediciones hechas y sabiendo el nivel de la relación C/I que requiere el sistema, se puede estimar si el sistema está bien dimensionado o si presenta problemas de interferencia.

El otro test mencionado, el de búsqueda del área de interferencia desde la celda, consiste en registrar el nivel de la señal mientras un equipo de usuario se desplaza en su celda o en una celda co-canal y se busca dentro de la celda interferida los diez máximos niveles de señal interferente. Estos diez valores medidos se promedian para representar el nivel de interferencia. Posteriormente, se desplaza el móvil a las otras celdas interferentes calculando nuevamente el nivel de interferencia.

Para finalizar con la interferencia co-canal, aunque en el siguiente apartado aportaré más detalles, algunas de las soluciones más sencillas para reducir este tipo de interferencia son:

- Aumentar la separación de las celdas co-canal.
- Uso de antenas direccionales y la técnica de sectorización de las celdas.
- Reducción de las alturas efectivas de las antenas en situaciones donde la reutilización de frecuencias es crítico.

1.10 Soluciones NLOS e interferencia co-canal

Llegados a este punto del proyecto en el que se ha explicado cada parte que forma el protocolo WIMAX, indicando sus características y sus posibles modelos, a continuación se detallarán las técnicas usadas para solventar los problemas que se crean cuando se está ante un escenario sin línea de visión directa, o bien si existe interferencia co-canal que degrada las capacidades del enlace.

Algunas de las técnicas que solucionan estos problemas son:

- Modulación adaptativa
- Diversidad
- OFDM
- MIMO
- Antenas inteligentes
- Reutilización de frecuencias
- Corrección de errores
- Subcanalización
- Control de potencia.

A continuación se explican cada una de ellas de forma detallada.

MODULACIÓN ADAPTATIVA

Esta técnica permite a los sistemas WIMAX ajustar el esquema de modulación de la señal, dependiendo de las condiciones de la relación señal a ruido (SNR) que existen en el enlace radio en cada momento. Si el enlace radio presenta una alta calidad, se podrá usar la modulación más alta (64-QAM) proporcionando al sistema la mayor capacidad permitida. Sin embargo, durante un desvanecimiento de la señal, el sistema puede desplazar la señal a un esquema de modulación menor para mantener una calidad mínima y una estabilidad del enlace, lo que permite superar desvanecimientos selectivos en el tiempo.

Para averiguar la calidad del enlace en cada momento, se usa un indicador de “calidad de canal” con el cual el SS puede proveer a la estación base de información sobre la calidad del enlace descendente, mientras que para el enlace ascendente, la estación base puede estimar la calidad del canal basándose sencillamente en la calidad de la señal recibida.

Como se ha mencionado antes, las modulaciones son automáticamente adaptadas en función de la distancia y las condiciones del canal, siendo utilizadas, normalmente, modulaciones QAM para distancias cortas y PSK para mayores distancias. Entre las modulaciones posibles, la 64QAM es la que proporciona mayor densidad de información por símbolo, es decir, es la de mayor rendimiento, mientras que la BPSK da la mayor robustez pero menor rendimiento, por lo que para un usuario cercano a la estación base con una cierta calidad en el enlace se podrá usar la modulación 64QAM y para un usuario que se encuentre en los límites de la celda se usará modulación BPSK.

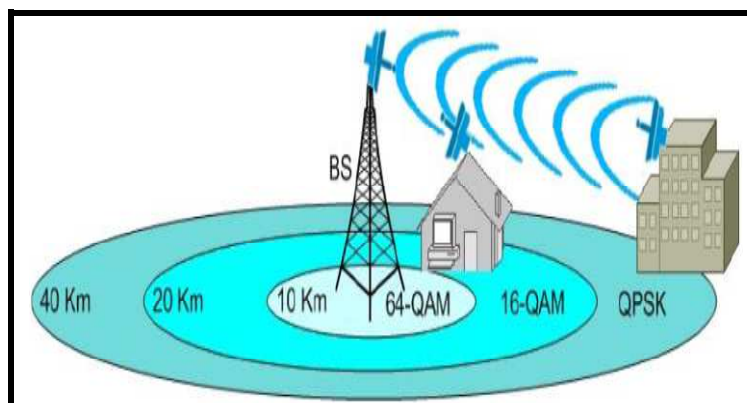


Figura 14: Modulaciones según distancia a la BS

En la siguiente tabla (Tabla 7) se muestran algunas de las posibles modulaciones y codificaciones que el sistema WIMAX permite, indicando además, la capacidad de transmisión que proporcionan:

Modulación	Codificación	Información [bits/símbolo]	Tasa en 5MHz[Mbps]
BPSK	1/2	0.5	1.89
QPSK	1/2	1	3.95
QPSK	3/4	1.5	6
16QAM	1/2	2	8.06
16QAM	3/4	3	12.18
64QAM	2/3	4	16.30
64QAM	3/4	4.5	18.36

Tabla 7: Modulaciones y codificaciones WIMAX

DIVERSIDAD

Se entiende por diversidad, el uso de varios receptores o bien técnicas de recepción de señales que simulen el hecho de tener varios receptores, para aumentar la relación señal a ruido del enlace e intentar superar con ello problemas de pérdidas provocados por los efectos del multicamino.

Esta técnica presenta dos ventajas principalmente:

- Proporciona fiabilidad: es la solución óptima para entornos donde existe multicamino, ya que trata los efectos de los nulos que aparecen por las reflexiones.
- La potencia media de la señal recibida aumenta, por lo que se produce una mejora respecto a no usar este sistema.

Existen muchos tipos de diversidad y diferentes formas de clasificación. Las más comunes son ordenar, según los parámetros del camino (diversidad de espacio, de frecuencia o de trayecto), o bien según el tipo de procesamiento de la señal (conmutación o combinación).

En concreto en los sistemas WIMAX, esta técnica se presenta de forma opcional, pero es cierto que al ser usada se incrementa la robustez del sistema, tanto en transmisión como en recepción. La opción de diversidad en transmisión en WIMAX utiliza codificación espacio-temporal para proporcionar independencia de la fuente de transmisión, lo que reduce el margen de fading y combate la interferencia. En cuanto a recepción, existen varias técnicas de combinación de la señal recibida de forma directa y por multicamino que permiten superar las interferencias o los efectos de desvanecimientos, aunque la más usada es MCR ('Combinación de relación máxima') en el que se utilizan dos sistemas de recepción.

OFDM

En el desarrollo inicial del estándar WIMAX, uno de los momentos claves fue la incorporación de la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). Este tipo de modulación proporcionó al estándar un gran número de beneficios que no tenía en sus anteriores versiones, puesto que la gran ventaja de esta modulación respecto a las que se venían usando, es la transmisión más eficiente de los datos ofreciendo enlaces a altas velocidades con mayor resistencia a desvanecimientos por multitrayectorias e interferencias.

La modulación OFDM se caracteriza por dividir una señal de banda ancha en un número de señales de banda reducida lo que conlleva, como ya se mencionó, un mejor uso del ancho de banda disponible. Es necesario usar modulación OFDM y no FDM convencional porque en la modulación FDM convencional los canales adyacentes se encuentran muy separados, usando una banda de guarda para minimizar la posibilidad de interferencia. En el caso de OFDM, esto no es necesario, puesto que para reducir la interferencia entre los canales adyacentes, lo único que se requiere es la ortogonalidad, por lo que el ancho de banda que se desperdiciaba para la banda de guarda ahora se puede aprovechar para transmitir datos. Hacer uso de la ortogonalidad no es más que elegir dos frecuencias que sean ortogonales entre sí, es decir, frecuencias que son múltiplo de la frecuencia fundamental.

Cada subportadora en la tecnología OFDM puede estar modulada de forma distinta, en concreto existen cuatro tipos de modulación de datos:

- Modulación por desplazamiento de fase de 2 símbolos (BPSK): es un tipo de modulación por desplazamiento de fase, en la que dos bits se modulan inmediatamente seleccionando uno de los cuatro grados posibles de desplazamientos de fase (0°, 90°, 180°, 270°).

- Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK): la principal ventaja de esta modulación es que ofrece la misma eficiencia de potencia que la BPSK utilizando la mitad del ancho de banda. Utiliza cuatro fases (45°, 135°, 225° y 315°) y el cambio de fase de un símbolo al siguiente se codifica con 2 bits por símbolo.
- Modulación de amplitud de cuadratura de 16 símbolos (16-QAM): es tipo de modulación hace uso de 16 símbolos gracias a que utiliza cuatro fases con cuatro amplitudes distintas.
- Modulación de amplitud de cuadratura de 64 símbolos (64-QAM) es el mismo concepto que la anterior modulación solo que en esta ocasión se dispone de más símbolos, puesto que se usan cuatro fases y dieciséis amplitudes.

Una vez que se ha realizado la modulación de los símbolos obtenidos, son tratados a través de un proceso de conversión paralelo-serie. A cada símbolo se le asigna una subportadora, y a ésta se le realiza una DFT inversa (IDFT) para generar una señal en el dominio del tiempo.

A parte de lo contado hasta ahora, uno de los grandes motivos del uso de OFDM en sistema WIMAX, es que es una tecnología eficiente para superar los problemas que presenta la propagación NLOS. Su habilidad para superar el efecto multicamino, la dispersión de retardo y la interferencia ISI de una forma eficiente, permite obtener mayores tasas de transferencia y facilita la corrección de posibles errores provenientes de los problemas NLOS citados. Otra de sus ventajas es la sencillez que proporciona a la hora de modular las portadoras individuales OFDM, ya que modular una señal de portadora simple más extensa es un proceso mucho más arduo.

MIMO

MIMO es el acrónimo en inglés de 'Multiple Input Multiple Output'. Se trata de una técnica en la que se usan múltiples antenas, tanto para recepción como para transmisión, por lo que se podría ver como una forma de la técnica de diversidad, explicada también en este apartado. Se logra aprovechando los fenómenos físicos, como la propagación multicamino, para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error por lo que se consigue un aumento de la eficiencia espectral.

El incremento de la tasa de transmisión se consigue dividiendo una transmisión de datos en múltiples tramas más pequeñas, donde cada una se modula y transmite a través de una antena diferente en un momento determinado, utilizando la misma frecuencia de canal que el resto de las antenas. Como el escenario donde se está trabajando normalmente presenta propagación multicamino, en recepción, la señal a la salida de cada antena es una combinación lineal de múltiples tramas de datos transmitidas por cada una de las antenas transmisoras. Una vez recibidas todas las tramas de datos, se

separan en el receptor usando algoritmos basados en estimaciones de todos los canales existentes entre transmisor y receptor.

Con esta técnica, además de aumentar la tasa de transmisión gracias a tener más antenas, el rango de alcance también se incrementa al aprovechar la ventaja de utilizar antenas en diversidad. Este aumento de la capacidad será proporcional al número de antenas del extremo del enlace que menos antenas tenga, aunque en MIMO se recomienda que ambos extremos tengan un número idéntico de antenas. En cuanto al consumo de potencia, el factor más crítico es el consumo de los amplificadores de potencia en la transmisión, pero debido al avance de la tecnología, actualmente pueden ser diseñados para transmitir a la misma potencia que un transmisor habitual.

ANTENAS INTELIGENTES

Siguiendo en la línea de poder mejorar lo máximo posible la eficiencia espectral de las redes, surgen las antenas inteligentes o ‘smart antennas’. Actualmente, estas antenas están proporcionando un rendimiento superior a las antenas tradicionales en cuanto a velocidad y eficiencia espectral, además de proporcionar una gran facilidad para poder orientar el haz de la antena según las necesidades particulares, por lo que se han convertido en una solución práctica y económica a algunos de los desafíos que la tecnología WIMAX planteaba. A pesar de esto, en el estándar 802.16 los sistemas de antenas adaptativas (‘AAS’) se presentan como una parte opcional.

Existen dos tipos de ‘smart antennas’:

- Antenas de array en fase o haces conmutados: usan un número fijo de haces escogiendo el más adecuado o bien un haz enfocado hacia la señal deseada y se mueve con ella.
- Array de antenas adaptativas: usan múltiples elementos de antena que gestionan la interferencia y ruido con el objetivo de maximizar la recepción de la señal. Para ello, durante la transmisión la señal, ésta puede ser limitada a la dirección donde está situado el receptor e igualmente en recepción, se limita a la dirección desde la que llega la señal deseada. Gracias a este sistema, se puede llegar a eliminar la interferencia co-canal que pudiera existir en el enlace y además se consume menos potencia al estar usando un haz mucho más concentrado.

REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIAS

Aunque este tema se trató en la sección 1.5 del presente trabajo, he decidido volver a hacer una breve mención de este método, puesto que en este apartado, se exponen las distintas técnicas usadas para reducir las interferencias y ésta supone una de las más eficaces para este fin.

A parte de los parámetros explicados en anteriores secciones, aplicando dichos conceptos en el caso concreto del estándar WIMAX, la elección de factor de reutilización de 1 en el centro, maximiza la eficiencia espectral, mientras que el factor mayor en los bordes disminuye el efecto de la interferencia co-canal. Además, un aspecto importante en este estándar, es que en la comunicación entre la BS y el receptor, la frecuencia, el intervalo de tiempo y el ajuste de potencia se realiza tanto la primera vez que se conectan como de forma periódica.

En la siguiente figura (Figura 15) se muestra un ejemplo de reutilización de frecuencia:

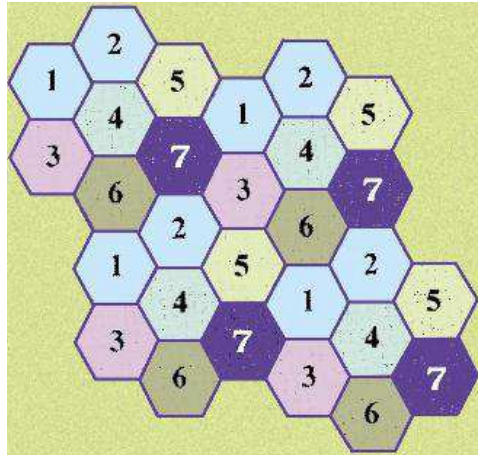


Figura 15: Reutilización de frecuencias.

CORRECCIÓN DE ERRORES

El estándar WIMAX incorporó estas técnicas de corrección de error con el fin de reducir los requerimientos de relación señal a ruido del sistema. Hace uso de una codificación de errores a posteriori (FEC) tipo Reed Solomon, codificación convolucional y algoritmos de ‘interleaving’ que permiten detectar y corregir errores consiguiendo mejorar la tasa de transferencia del sistema. Estas técnicas ayudan a recuperar paquetes de error que pueden perderse debido al multicamino selectivo en frecuencia o errores de ráfaga.

SUBCANALIZACIÓN

En el caso de esta técnica, al igual que pasaba con otras como la diversidad, en el estándar WIMAX se especifica de manera opcional para el enlace ascendente. Se trata de una técnica que concentra la potencia transmitida en algunas portadoras OFDM, aumentando así la ganancia del sistema, consiguiendo con ello extender el alcance, superar las pérdidas de penetración en construcciones o reducir el consumo de potencia del equipo de abonado. En el caso de sistemas móviles, el uso de la subcanalización está más expandido en OFDMA, porque permite un uso más flexible de los recursos.

La subcanalización permite que el balance del enlace sea equilibrado, es decir, que las ganancias del sistema para el enlace ascendente y descendente sean parecidas. Sin su uso, debido a entre otras razones a restricciones regulatorias, normalmente, causan que el balance del enlace sea asimétrico provocando que el enlace de subida sea limitado.

En la interfaz física OFDM se establece que el enlace ascendente puede ser dividido hasta en 15 subcanales agrupados en un cierto número de subportadoras, lo cual permite a los SS concentrar la potencia de transmisión en algunas subportadoras. WIMAX permite que el SS pueda transmitir en 1, 2, 4, 8 y 16 subcanales, siendo esta última la opción por defecto, es decir, usando 192 subportadoras.

Otro dato importante a tener en cuenta, es que la subcanalización afecta también a la capacidad del canal de forma indirecta, ya que cambia la unidad de asignación mínima (MAU) del enlace ascendente. El MAU corresponde a la menor unidad de datos que puede usar un SS, por lo que es un subcanal que, en el caso de OFDM con FFT de 256 puntos, estará compuesto por 12 subportadoras (192 subportadoras de datos divididas en 16 subcanales).

CONTROL DE POTENCIA

Los algoritmos de control de potencia se utilizan para la mejora del rendimiento global del sistema y de las interferencias potenciales con las otras estaciones base adyacente. Este sistema se encuentra implementado en la estación base, por lo que ella es la encargada de enviar información de control de potencia a cada estación de abonado y recibir esos datos para regular el nivel de potencia transmitido, de forma que el nivel recibido en la BS está a un nivel predeterminado. Cuando se está ante un ambiente dinámico de fading cambiante, este nivel predeterminado significa que el SS sólo transmite con la potencia suficiente para cumplir con ese requisito. Si este nivel de potencia predeterminado no está definido, el SS tendrá su transmisión basada en las condiciones de peor caso.

Los algoritmos de control de potencia para que funcionen correctamente y sean de utilidad a las estaciones base, deben tener también en cuenta la interacción de los amplificadores de potencia de RF con diferentes esquemas de trama. Los datos que se han comentado antes que envían los SS a las estaciones base cuando éstas piden información, no es más que la máxima potencia disponible que tienen y la potencia de transmisión que está usando en ese momento. Con estos parámetros, las BS puede asignar esquemas de codificación y modulación óptimos para asignar eficientemente el número de subcanales.

Para finalizar, únicamente añadir que para enlaces con visión directa, la potencia de transmisión de los SS es aproximadamente proporcional a la distancia desde la BS, pero para modelos NLOS esta potencia dependerá también de las obstrucciones que existan en el camino de la transmisión.

1.11 Aplicaciones

El estándar WIMAX gracias a las características presentadas en anteriores secciones y entre todas ellas, especialmente a que dispone de gran ancho de banda y de herramientas avanzadas de control de tráfico de red, permite aplicaciones que requieren tráfico con prioridades o con gran capacidad de datos.

Entre las aplicaciones en las que se puede emplear la tecnología WIMAX se encuentran:

- Dar cobertura a zonas rurales o de baja concentración de usuarios donde el despliegue de cable no es rentable debido a su coste de instalación.
- Redes ‘backhaul’ para hotspots WLAN. Permite la interconexión de redes WLAN de corto alcance para formar grandes redes de telecomunicaciones. También puede ser interesante como alternativa ‘backhaul’ en despliegues de redes celulares donde actualmente se usan líneas dedicadas o enlaces de microondas para alcanzar las estaciones base.
- Dar cobertura de “última milla”: Conexión en edificios equipados con estaciones de usuario y estaciones base, o bien conexión de las estaciones base directamente a la red troncal.
- Acceso de banda ancha residencial y ‘Small Offices Home Offices’ (SOHO): acceso a internet de alta velocidad que puede incluir servicios multimedia como videoconferencia, televisión digital o video bajo demanda (VOD) con una capacidad comparable al servicio cableado.
- Soluciones extremo a extremo aplicables en diferentes sectores: medidores inteligentes, terminales para suministrar servicios que requieren baja latencia como VoIP.
- Telemetría.
- En los países en desarrollo resulta una buena alternativa para el despliegue rápido de servicios, compitiendo directamente con las infraestructuras basadas en redes de satélites, que son muy costosas y presentan una alta latencia.
- Uso en la minería: cobertura en instalaciones temporales o sectores donde se realizan estudios geológicos.
- Cobertura en desastres. Como ejemplo real de este caso, durante el huracán Katrina, la red WIMAX fue la única que se mantuvo activa mientras que el resto de sistemas de comunicaciones se colapsaron.
- Transmisión en directo de eventos o noticias en lugares remotos, evitando conexiones microondas.

1.12 Casos de Éxito

Una vez se han visto en la sección anterior las aplicaciones que este sistema presenta, en este apartado el fin es hacer ver que esta tecnología es una tecnología actual y real y no sólo un estándar sin ninguna utilidad real. Para demostrar eso, en esta sección se verán algunos casos de éxito de este estándar, tanto a nivel nacional como a nivel mundial.

Centrándome primero en los casos de éxito en España, el caso más reciente (data de Marzo de 2012) que además salió publicado tanto en prensa como otros medios debido al avance que supone en cuanto cobertura total de Internet a un territorio, es el caso del despliegue de red WIMAX en Menorca [23]. Este proyecto desarrollado por la compañía Infotelecom Networks S.L denominado “Menorca Accesible” abarca tanto la implantación como el mantenimiento, operación y prestación de los servicios a los usuarios y empresas que lo soliciten. La red está formada por 16 estaciones bases instaladas en diversos pueblos de la isla con el fin de conseguir cobertura total y dar servicio tanto a zonas rústicas como turísticas que, anteriormente, estaban sin cobertura.

Otro de los casos de éxito en España está en Asturias, donde desde el año 2010 se realiza un despliegue y uso de red WIMAX que abarca un proyecto con propósito de cobertura WIMAX en 521 municipios asturianos. La implantación en esta región está liderada por la empresa Nostracom Telecomunicaciones.

A estos proyectos, se añaden los proyectos desarrollados en:

- Andalucía donde se ha implantado, por ejemplo, en los Ayuntamientos de Sevilla, Jerez o Cádiz.
- Comunidad de Madrid, donde en pueblos como Alcorcón, disponen de una red WIMAX formada por más de 70 radioenlaces y se ha puesto en marcha un sistema de videovigilancia en edificios municipales y colegios mediante esta tecnología, conectando entre sí 120 cámaras mediante antenas inalámbricas. Este caso sirve para ver que esta tecnología no solo puede ser usada para zonas rurales o remotas, sino que puede tener usos en ciudades tan grandes y conectadas como la del ejemplo.
- Canarias con el desarrollo de diversos pilotos desde el año 2006 en las islas de La Gomera, El Hierro, La Palma, Fuerteventura y Lanzarote.
- Castilla La Mancha donde la empresa TelecomCLM es la encargada del despliegue y mantenimientos de la red.
- Castilla y León donde se ha hecho encargo a la empresa Iberbanda de diversos proyectos para dar cobertura WIMAX a ciertas zonas rurales.
- Extremadura, cuya universidad cuenta con una red inalámbrica que usar WIMAX en su tronco principal y WiFi para las conexiones finales, con 150 puntos de acceso en los cuatro campus de esta institución.
- Otros: Cataluña, Euskadi, Murcia, Galicia, Comunidad Valenciana...

En cuanto a nivel mundial, WIMAX se ha desplegado en más de 80 países en el mundo, donde la región con mayor crecimiento en esta tecnología es la zona Asia-Pacífico, donde se prevé que a finales del 2013 podría haber hasta 43 millones de suscriptores WIMAX.

Algunos de los países que han potenciado el despliegue de tecnología WIMAX dentro de sus fronteras son:

- Rusia: desplegó redes en algunas zonas rurales pero también en grandes ciudades como Moscú o San Petersburgo.
- Suecia: empresas como Intel compraron licencias en 2008 por valor de 26,4 millones de dólares por 50MHz de espectro TDD en la banda 2,6 para la instalación de redes WIMAX. Uno de los casos de éxito en este país es el representado por el Ayuntamiento de Göten.
- Finlandia donde se instaló una red piloto de WIMAX móvil.
- América Latina: países como Chile, Brasil, Colombia, México y Perú son los países más activos en las implantaciones de WIMAX.
- EEUU: empresas como Sprint lideraron desde el año 2008 la implantación de este tipo de sistema. Su primera red comercial WIMAX se comercializó en Baltimore con el nombre de XOHM.

2. DISEÑO Y SIMULACIONES DE LA INTERFERENCIA CO-CANAL EN WIMAX

2.1 Introducción al diseño de la simulación

La simulación del sistema WIMAX para llevar a cabo el estudio de la interferencia co-canal del sistema, se ha realizado sobre el programa matemático MATLAB en su versión 7.11.0 (R2010b). Esta elección se justifica en la gran potencia matemática y de simulación que ofrece este programa.

Como el objetivo de este proyecto es realizar un estudio de la interferencia co-canal para conocer las limitaciones y efectos que produce sobre una comunicación donde exista este fenómeno, se ha tomado como punto de partida para la simulación de la capa física del estándar WIMAX, el trabajo de simulación en MATLAB “Estudio y Simulación de la capa física de la norma 802.16d (WIMAX)” [21] publicado por la Universidad de Sevilla (España). A partir de este precedente, se ha realizado la programación para la simulación de la interferencia co-canal que es el objetivo real de este trabajo.

Además de lo anteriormente mencionado, ha sido necesaria la consulta de diversos manuales relacionados con la programación en MATLAB, en concreto con la programación de sistemas de comunicación en MATLAB, así como documentos donde se detallan parámetros concretos del estándar necesarios para la simulación. Como a continuación realizaré un repaso de los distintos elementos y parámetros necesarios para la simulación, iré citando qué documento concreto se ha consultado para cada entidad.

Con el fin de que el estudio de la interferencia co-canal sea entendido, y en cuanto a los resultados, sea sabido de dónde salen o cómo se han hallado, en primer lugar realizaré una detallada explicación de todos los componentes de la simulación estructurándolos en tres grandes bloques que son los que componen cualquier tipo de comunicación: Transmisor, Canal y Receptor.

2.2 Diseño de la simulación

Como he comentado al final del apartado anterior, el objetivo de esta parte de la explicación es dar una visión en detalle de cada parte de la simulación, relacionando lo que dicta la norma 802.16 con la simulación que se ha realizado.

2.2.1 Transmisor

Debido a que el transmisor es un bloque demasiado grande para entenderlo en su conjunto será necesario explicar las partes que lo componen. Estas partes son:

- Generador de datos
- Aleatorización
- Codificación
- Interleaving
- Generador de portadoras
- Modulador
- Prefijo Cíclico

2.2.1.1 Generador de datos

Dado que esto es una simulación de la realidad, es necesario crear de forma artificial una secuencia de bits que se usará como información a transmitir. Para crear esta secuencia, lo primero que se ha tenido en cuenta para saber la cantidad de bits necesarios es el tipo de modulación en la que se realizará la simulación. Una vez elegida la modulación de la simulación, para saber la cantidad de bits necesarios, he hecho uso de la Tabla 215 de la norma WIMAX [9] donde se relaciona la cantidad de bit a generar con la modulación y la tasa de codificación RS-CC:

<i>MODULACIÓN</i>	<i>TAMAÑO BLOQUE SIN CODIFICAR (bytes)</i>	<i>TAMAÑO BLOQUE CODIFICADO (bytes)</i>	<i>TASA CODIFICACIÓN</i>	<i>CODIGO RS</i>	<i>TASA CODIGO CC</i>
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

Tabla 8: Generación de datos

Una vez conocidos, gracias a la tabla anterior (Tabla 8), la cantidad de bytes necesarios para hacer la simulación, se realiza la secuencia a transmitir con dicha longitud, mediante una función de MATLAB que crea aleatoriamente unos y ceros (función 'randint').

2.2.1.2 Aleatorización

La primera etapa para la codificación de los datos consiste en el proceso de aleatorización de los bits. Esta etapa tiene como objetivo maximizar la entropía de la fuente, es decir, igualar la probabilidad de transmisión de unos y de ceros consiguiendo eliminar largas cadenas de unos y ceros consecutivos y haciendo el proceso de recepción más óptimo.

En el estándar WIMAX, la aleatorización se realiza en cada secuencia de datos del enlace ascendente y descendente, de forma independiente, y siempre a los datos a transmitir, nunca a los preámbulos de la trama. Esta independencia de aleatorización entre en enlace ascendente y descendente se consigue gracias a que cada aleatorización se inicia con una semilla (código de inicialización del registro de aleatorización de datos) distinta.

Para llevar a cabo la aleatorización se utiliza un generador de secuencia binaria definido por el polinomio $1+X_{14}+X_{15}$ [9] y que muestro a continuación:

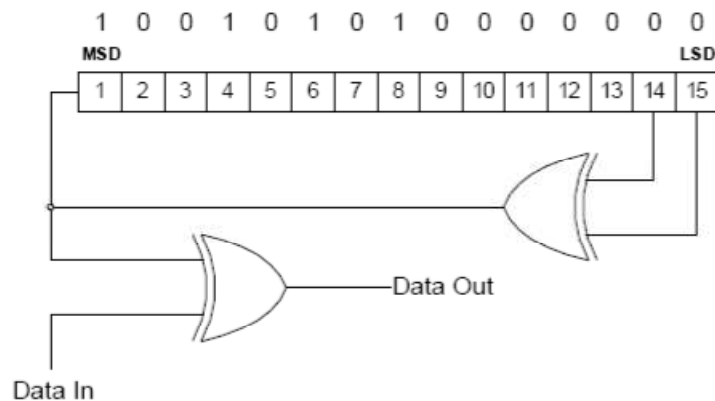


Figura 16: Registro de aleatorización

Una vez explicada de forma breve la base teórica de la aleatorización tal y como la define la norma, a continuación explicaré cómo se implementa este proceso en MATLAB.

La parte más importante de este proceso es la elección de la semilla inicial que se ha mencionado antes. Dicha semilla se genera mediante cuatro parámetros que indican la conexión que se está realizando: 'Base Station Identifier' (BSID), 'Downlink Interval Usage Code' (DIUC), 'Uplink Interval Usage Code' (UIUC) y el número de trama. El parámetro BSID es un identificador de la estación base, el DIUC/UIUC es el intervalo de uso en el enlace descendente y ascendente respectivamente (ver sección 1.7) y el número de trama indica en qué trama se transmite la información.

En el caso de esta simulación, se ha decidido simular un enlace descendente y dado que solo se transmitirá información, el número de trama tendrá valor 1 quedando la semilla para el enlace descendente con valor inicial 000111011110001.

Una vez la semilla ha sido creada no hay más que aplicar el sistema explicado anteriormente para obtener los datos aleatorizados.

2.2.1.3 Codificación

Este apartado se basa en la descripción del sistema FEC que permite, en caso de que existan errores en la transmisión, la recuperación de dichos errores en recepción sin necesidad de hacer una retransmisión.

El estándar define tres formas de realizar esta codificación: código turbo convolucionales ('Convolutional Turbo Codes', CTC), Reed-Solomon con posterior codificación convolucional (RS-CC) o códigos turbo bloque ('Block turbo codes', BTC). Aunque, como se ha mencionado, la norma define tres métodos de codificación, la única que obliga a usar es la segunda, RS-CC, por ello, será la que se implemente en este trabajo.

Para llevar a cabo la codificación RS-CC requerida, se definen los siguientes polinomios:

- Polinomio generador de código $g(x) = (x+\lambda^0) (x+\lambda^1) (x+\lambda^2) \dots (x+\lambda^{2T-1})$
- Polinomio generador de GF (2^8) $= x^8+x^4+x^3+x^2+1$

Y los siguientes parámetros:

- $K=239$. Donde K es el número de bytes de datos antes de la codificación.
- $N=255$. Donde N es el número de bytes de datos después de la codificación.
- $T=8$. Donde T es el número de bytes de datos que se pueden llegar a corregir aplicando la codificación.

Una vez la codificación Reed-Solomon está realizada, a continuación se explica la codificación convolucional que le sigue. Para explicar este tipo de codificación se ha decidido que lo más claro era mostrar la siguiente figura donde se puede ver el generador del código [21]:

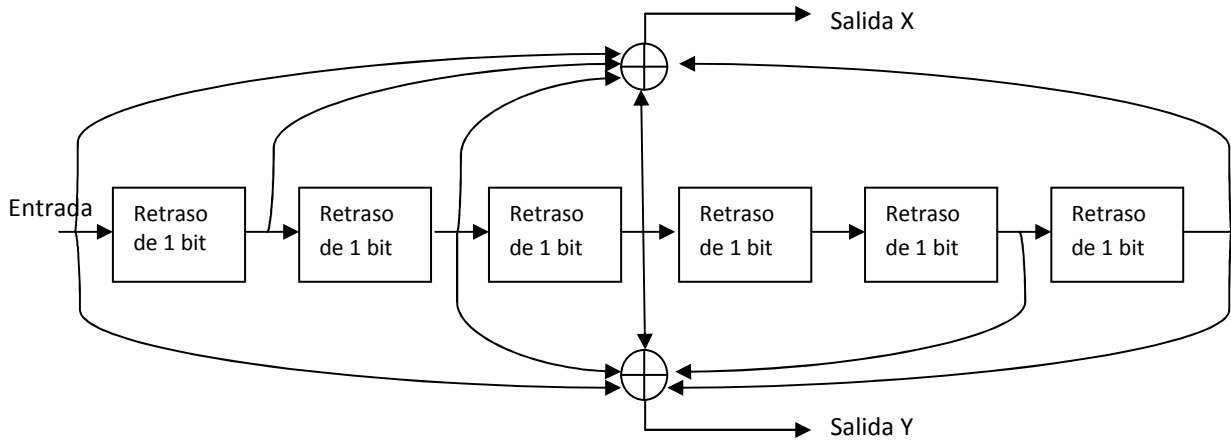


Figura 17: Generador de código

Aunque, originariamente, el sistema está pensado para conseguir una tasa de codificación de 1/2, esta tasa se puede modificarse sin más que desechar ciertos bits de la secuencia original obtenida. A este proceso se le denomina ‘puncturing’. En la siguiente tabla (Tabla 214 de la norma) se muestra las distintas tasas de codificación que se pueden obtener con este proceso:

Tasa	Tasa del código			
	1/2	2/3	3/4	5/6
X	1	10	101	10101
Y	1	11	110	11010
XY	X_1Y_1	$X_1Y_1Y_2$	$X_1Y_1Y_2X_3$	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4Y_5$

Tabla 9: Tasas de codificación con configuración ‘puncturing’^[9]

Al igual que en los anteriores apartados, ahora se explicará brevemente como se ha implementado sobre MATLAB esta base teórica que define la norma.

El codificador implementado lo primero que deja elegir es si se desea codificar o no. Si no se desea codificar, el programa lo único que hace es mandar los datos introducidos a la etapa de interleaving del codificador que será explicada en el siguiente apartado. Si se desea codificar, la primera etapa es la aleatorización, que fue explicada anteriormente. Una vez se ha hecho la aleatorización de los datos, la segunda etapa es aplicar la codificación Reed-Solomon tal como indica la norma. Una vez los datos han sido codificados por el método Reed-Solomon, se envían al codificador convolucional, ya que para esta simulación se ha elegido el tipo de codificación RS-CC por ser el más común en sistemas WIMAX. Con esta codificación realizada, los datos están listos para la etapa de interleaving que, como se ha mencionado ya, se explicará en la siguiente sección.

2.2.1.4 Interleaving

La técnica de interleaving tiene como fin evitar que una interferencia, o bien un desvanecimiento del canal, afecten al conjunto de bits que guardan información correlada en la transmisión. Por este motivo, esta técnica no es más que la permuta de distintos bits para conseguir una transmisión menos vulnerable a las ráfagas de errores.

El interleaving se ejecuta en dos fases. En una primera fase se consigue que bits adyacentes no sean transmitidos en portadores adyacentes y en la segunda fase que bits adyacentes no se transmitan en los bits más significativos de la constelación.

Las ecuaciones que definen estas dos permutaciones son:

- Primera fase (k=0, 1, ..., N_{cbps} -1):

$$m_k = \left(\frac{N_{cbps}}{12}\right) * mod(k, 12) + floor\left(\frac{k}{12}\right)$$

- Segunda fase (k=0, 1, ..., N_{cbps} -1):

$$j_k = s * floor\left(\frac{m_k}{s}\right) + mod\left[m_k + N_{cbps} - floor\left(\frac{12 * m_k}{N_{cbps}}\right), s\right]$$

donde N_{cbps} es el tamaño del bloque que hay que permutar. Este valor depende del tipo de modulación que se vaya a usar y viene definido por la norma [9]:

	Defecto (16 subcanales)	8 subcanales	4 subcanales	2 subcanales	1 subcanal
	N _{cbps}				
BPSK	192	96	48	24	12
QPSK	384	192	96	48	24
16-QAM	768	384	192	96	48
64-QAM	1152	576	288	144	72

Tabla 10: Tamaño bloque para el Bit Interleaver

La implementación de esta sección en Matlab no es más que aplicar las dos fases de permutación expuestas, aplicando la configuración por defecto (16 subcanales) de la tabla anterior para hallar el valor del tamaño del bloque N_{cbps} correspondiente, dependiendo de la modulación elegida por el usuario de la modulación. Se ha elegido la subcanalización de 16 subcanales por ser la configuración por defecto.

2.2.1.5 Generador de portadoras

La creación de las portadoras es una parte importante de todo el proceso, puesto que las portadoras son la que consiguen la sincronización y estimación del canal en el receptor.

La colocación de dichas portadoras viene definida por la estructura de los símbolos OFDM como se muestra a continuación [9]:

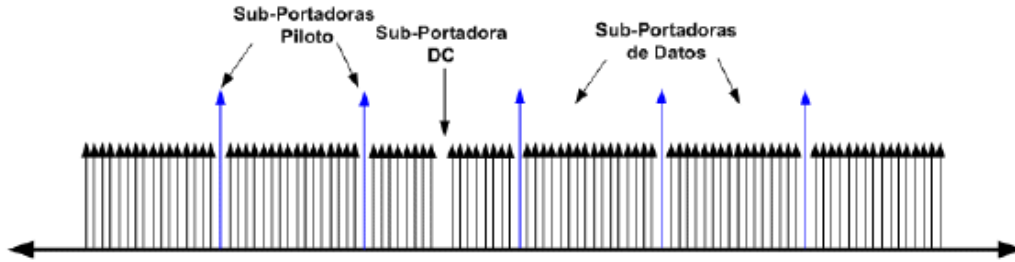


Figura 18: Símbolo OFDM

Tal como define la norma del estándar, la generación de las portadoras depende de si se está definiendo el enlace ascendente o descendente, puesto que según se use uno u otro enlace, hay que elegir una semilla. En este caso, para la simulación se usará un enlace descendente en el cual para la inicialización del sistema se supondrá que se está transmitiendo siempre el símbolo 1, y cuyo registro, viene definido en la norma con el polinomio generador $X_{11}+X_9+1$ [9, sección 8.3.3.4.2]. Una vez inicializado el registro y arrancado el sistema, se obtienen las posiciones donde hay que colocar las portadoras. Como del paso anterior se obtiene la posición dónde van situadas las portadoras, el siguiente paso es mapearlas en la constelación elegida, sabiendo que la potencia de los pilotos es el doble de la potencia de los bits de datos.

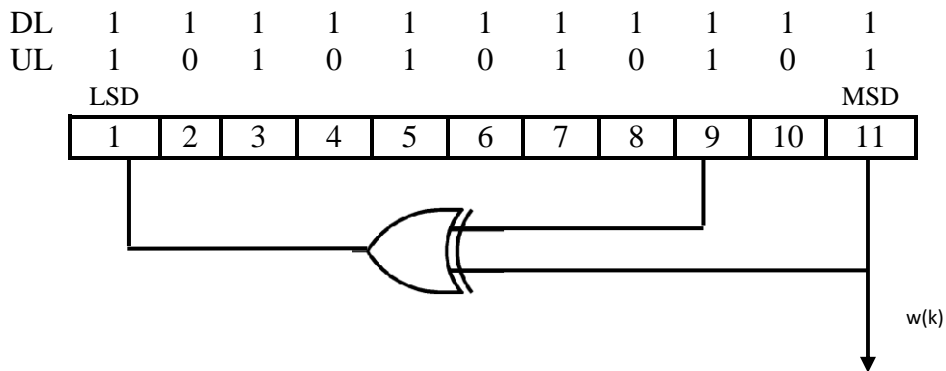


Figura 19: Registro para modulación de portadoras piloto

2.2.1.6 Modulador

En este apartado de modulación, hay que distinguir entre la modulación de los datos a transmitir y la modulación de las portadoras piloto.

Como se ha explicado en secciones anteriores, para la modulación de los datos se escoge una de entre las cuatro modulaciones que define el estándar: BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM usando para la asignación de los bits el código Gray (código binario en que dos valores sucesivos difieren solamente en uno de los dígitos). A modo de ejemplo se muestra a continuación una figura de la constelación BPSK con codificación Gray y otra constelación QPSK con codificación Gray.

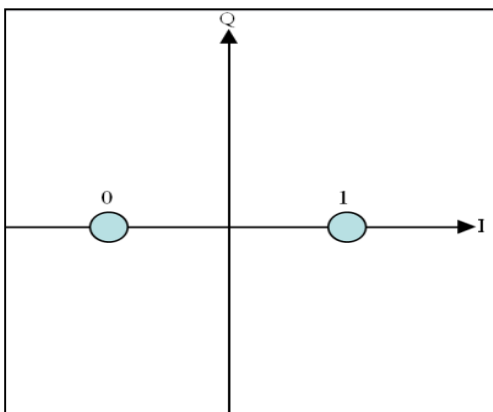


Figura 20: BPSK con codificación Gray

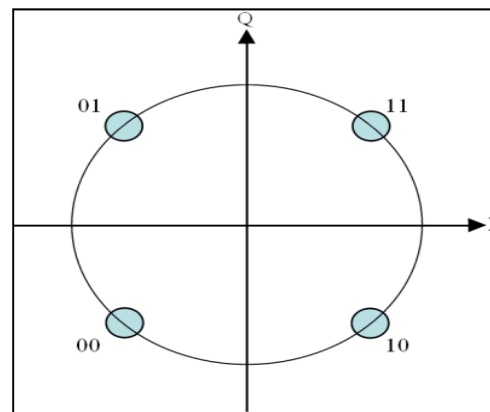


Figura 21: QPSK con codificación Gray

En cuanto a la implementación de la simulación, el código fuente está preparado para simular en cualquiera de las cuatro modulaciones disponibles con tal solo elegir una de ellas al comienzo de la simulación.

2.2.1.7 Prefijo Cíclico

El prefijo cíclico es lo único que falta por añadir a la información a enviar para completar el proceso que se realiza en el transmisor.

El concepto de prefijo cíclico surge de la necesidad de combatir la interferencia ISI que se puede dar en una comunicación, donde el canal es selectivo en frecuencia. El prefijo cíclico tiene como fin separar los símbolos de información que son adyacentes y, para ello, lo que se aplica es introducir una serie de muestras al inicio y final de cada símbolo. Es necesario hacerlo cíclico para que la IDFT que se hará posteriormente no se vea modificada por esa cantidad de bytes adicionales.

Con esto se consigue que, en el caso de que exista interferencia ISI, las últimas muestras de un símbolo OFDM no distorsionen a las primeras muestras del símbolo posterior, es decir, que no haya un solape de la información que impida su correcta separación en el receptor.

Los valores típicos del prefijo cíclico suelen ser $1/4$, $1/8$, $1/16$ o $1/32$ y dicho valor se elige en función de la duración del canal, ya que el prefijo cíclico tiene que tener una duración de, al menos, el máximo retraso del canal con el que se esté trabajando, para así asegurar que el número de muestras adicionales que se introduce es suficiente para que no exista el solape entre símbolos.

En el caso de la simulación que se usará, está programada para que este parámetro sea seleccionado por el usuario, ya que dependerá del canal elegido para la simulación, el cual también podrá ser elegido por el usuario como se verá más adelante.

Una vez que se ha introducido el prefijo cíclico a la secuencia generada por el transmisor durante todo el proceso, la información está lista para su envío por lo que se hace la IFFT de dicha secuencia y con esto acaba la función del transmisor.

2.2.2 Canal

Para una primera simulación del canal se utilizará el modelo más simple que existe, que es un modelo en el que solo exista ruido AWGN. Después, en posteriores simulaciones, se usarán los seis modelos ‘Stanford University Interim models’ (SUI) de propagación desarrollados por la Universidad de Stanford. Se ha decidido el uso de estos modelos ya que son los que se aplican comúnmente en simulaciones de WIMAX y están recomendados por varias organizaciones como “Wimax Forum”.

Los modelos SUI se diseñaron no solo para ser aplicados en la tecnología WIMAX, sino que también pueden ser aplicados a otras tecnologías inalámbricas de banda ancha. La elección de usar uno u otro modelo de los seis que existen vendrá dada en función del escenario o terreno donde se quiera hacer la simulación.

Tipo A	SUI-5, SUI-6
Tipo B	SUI-3, SUI-4
Tipo C	SUI-1, SUI-2

Tabla 11: Modelos SUI

2.2.2.1 Modelo Tipo A

El modelo SUI tipo A es el empleado cuando el escenario que se quiere simular se trata de un terreno montañoso con niveles de vegetación medios y altos que corresponden a condiciones de pérdidas elevadas. Como se observó en la tabla anterior, este modelo engloba a los modelos SUI-5 y SUI-6.

Las características del modelo SUI-5 [22] son:

Canal SUI-5				
	Trayecto 1	Trayecto 2	Trayecto 3	Unidades
Retraso	0	4	10	μs
Potencia (omni)	0	-5	-10	dB
90 % Factor K (omni)	0	0	0	
75 % Factor K (omni)	0	0	0	
50 % Factor K (omni)	2	0	0	
Potencia (30°)	0	-11	-22	dB
90 % Factor K (30°)	0	0	0	
75 % Factor K (30°)	2	0	0	
50 % Factor K (30°)	7	0	0	
Doppler	2	1.5	2.5	Hz
		τ_{rms}	F, Factor de normalización	Factor K global
Antena omnidireccional		2.842 μs	-1.5113	K = 0.1 (90 %) K = 0.3 (75 %) K = 1.0 (50 %)
Antena 30°		1.276 μs	-0.3573	K = 0.4 (90 %) K = 1.3 (75 %) K = 4.2 (50 %)
Tipo del terreno: A	Correlación de antena: $\rho_{ENV} = 0,3$			
Factor de reducción de ganancia: GRF = 4 dB				

Tabla 12: Modelo SUI-5

Las características del modelo SUI-6 [22] son:

Canal SUI-6				
	Trayecto 1	Trayecto 2	Trayecto 3	Unidades
Retraso	0	4	10	μs
Potencia (omni)	0	-5	-10	dB
90 % Factor K (omni)	0	0	0	
75 % Factor K (omni)	0	0	0	
50 % Factor K (omni)	2	0	0	
Potencia (30°)	0	-11	-22	dB
90 % Factor K (30°)	0	0	0	
75 % Factor K (30°)	2	0	0	
50 % Factor K (30°)	7	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
		τ_{rms}	F, Factor de normalización	Factor K global
Antena omnidireccional		5.240 μs	-0.5683	K = 0.1 (90 %) K = 0.3 (75 %) K = 1.0 (50 %)
Antena 30°		2.370 μs	-0.1184	K = 0.4 (90 %) K = 1.3 (75 %) K = 4.2 (50 %)
Tipo del terreno: A	Correlación de antena: $\rho_{ENV} = 0,3$			
Factor de reducción de ganancia: GRF = 4 dB				

Tabla 13: Modelo SUI-6

2.2.2.2 Modelo Tipo B

El modelo SUI tipo B es el empleado cuando el escenario que se quiere simular se trata de un terreno plano con niveles de vegetación medios, o bien un terreno montañoso con niveles bajos de vegetación. Como se observó en la Tabla 10, este modelo engloba a los modelos SUI-3 y SUI-4.

Las características del modelo SUI-3 [22] son:

Canal SUI-3				
	Trayecto 1	Trayecto 2	Trayecto 3	Unidades
Retraso	0	0.4	0.9	μs
Potencia (omni)	0	-5	-10	dB
90 % Factor K (omni)	1	0	0	
75 % Factor K (omni)	7	0	0	
Potencia (30°)	0	-11	-22	dB
90 % Factor K (30°)	3	0	0	
75 % Factor K (30°)	19	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
		τ_{rms}	F, Factor de normalización	Factor K global
Antena omnidireccional		0.264 μs	-1.5113	K = 0.5 (90 %) K = 1.6 (75 %)
Antena 30°		0.123 μs	-0.3573	K = 2.2 (90 %) K = 7.0 (75 %)
Tipo del terreno: B	Correlación de antena: $\rho_{ENV} = 0,4$			
Factor de reducción de ganancia: GRF = 3 dB				

Tabla 14: Modelo SUI-3

Las características del modelo SUI-4 [22] son:

Canal SUI-4				
	Trayecto 1	Trayecto 2	Trayecto 3	Unidades
Retraso	0	1.5	4	μs
Potencia (omni)	0	-4	-8	dB
90 % Factor K (omni)	0	0	0	
75 % Factor K (omni)	1	0	0	
Potencia (30°)	0	-10	-20	dB
90 % Factor K (30°)	1	0	0	
75 % Factor K (30°)	5	0	0	
Doppler	0.2	0.15	0.25	Hz
		τ_{rms}	F, Factor de normalización	Factor K global
Antena omnidireccional		1.257 μs	-0.3930	K = 0.2 (90 %) K = 0.6 (75 %)
Antena 30°		0.563 μs	-0.0768	K = 1.0 (90 %) K = 3.2 (75 %)
Tipo del terreno: B	Correlación de antena: $\rho_{ENV} = 0,3$			
Factor de reducción de ganancia: GRF = 4 dB				

Tabla 15: Modelo SUI-4

2.2.2.3 Modelo Tipo C

El modelo SUI tipo C es el empleado cuando el escenario que se quiere simular se trata de un terreno plano con niveles de vegetación bajos o nulos. Como se observó en la Tabla 10, este modelo engloba a los modelos SUI-1 y SUI-2.

Las características del modelo SUI-1 [22] son:

Canal SUI-1				
	Trayecto 1	Trayecto 2	Trayecto 3	Unidades
Retraso	0	0.4	0.9	μs
Potencia (omni)	0	-15	-20	dB
90 % Factor K (omni)	4	0	0	
75 % Factor K (omni)	20	0	0	
Potencia (30°)	0	-21	-32	dB
90 % Factor K (30°)	16	0	0	
75 % Factor K (30°)	75	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
		τ_{rms}	F, Factor de normalización	Factor K global
Antena omnidireccional		0.111 μs	-0.1771	K = 3.3 (90 %) K = 10.4 (75 %)
Antena 30°		0.042 μs	-0.0371	K = 14.0 (90 %) K = 44.2 (75 %)
Tipo del terreno: C	Correlación de antena: $\rho_{ENV} = 0,7$			
Factor de reducción de ganancia: GRF = 0 dB				

Tabla 16: Modelo SUI-1

Las características del modelo SUI-2 [22] son:

Canal SUI-2				
	Trayecto 1	Trayecto 2	Trayecto 3	Unidades
Retraso	0	0.4	1.1	μs
Potencia (omni)	0	-12	-15	dB
90 % Factor K (omni)	2	0	0	
75 % Factor K (omni)	11	0	0	
Potencia (30°)	0	-18	-27	dB
90 % Factor K (30°)	8	0	0	
75 % Factor K (30°)	36	0	0	
Doppler	0.2	0.15	0.25	Hz
		τ_{rms}	F, Factor de normalización	Factor K global
Antena omnidireccional		0.202 μs	-0.3930	K = 1.6 (90 %) K = 5.1 (75 %)
Antena 30°		0.069 μs	-0.0768	K = 6.9 (90 %) K = 21.8 (75 %)
Tipo del terreno: C	Correlación de antena: $\rho_{ENV} = 0,5$			
Factor de reducción de ganancia: GRF = 2 dB				

Tabla 17: Modelo SUI-2

Una vez explicados todos los modelos, cabe destacar un gran inconveniente que presentan estos modelos, y es precisamente debido a la clasificación del terreno que aplican, puesto que ninguno de los seis considera zonas urbanas, por lo que hay que ajustar alguno de los modelos a esas zonas aunque no sea lo más óptimo.

2.2.2.4 Simulación de los canales

Llegados a este punto en el que se conoce gracias a las secciones anteriores cómo se definen los diferentes canales que se modelan en WIMAX, para la simulación se usan los siguientes parámetros, cuyos valores son extraídos de las tablas anteriores según el modelo de canal elegido:

- Potencia en cada camino
- Factor K de la distribución Ricean
- Retraso de cada camino
- Máxima frecuencia Doppler
- Coeficiente de correlación de antena
- Factor de normalización de ganancia

Por último, teniendo estos valores, se crea la respuesta impulsiva del canal de simulación.

Si el canal utilizado es AWGN todos estos pasos no son necesarios, simplemente se indicará que el valor del canal es la unidad y la única distorsión que habrá será ruido blanco.

2.2.3 Receptor

El primer fundamento que hay que tener en cuenta es que el receptor se diseña de forma simétrica al transmisor, por lo que las etapas del receptor están enfocadas a deshacer todas las fases que se hicieron en el transmisor. Por lo que las fases que hay que llevar a cabo en el receptor son:

- Eliminación Prefijo Cíclico y FFT
- Extracción de los datos
- Demodulador
- De-interleaving
- Decodificación
- Aleatorización

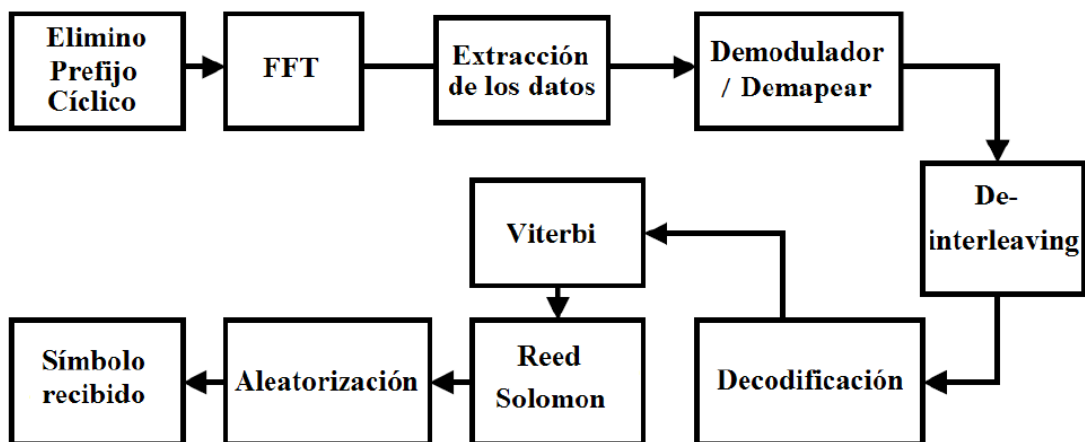


Figura 22: Etapas receptor

2.2.3.1 Eliminación del Prefijo Cíclico y FFT

Cuando la secuencia transmitida llega al receptor, el primer paso a realizar es eliminar el prefijo cíclico que se introdujo para evitar interferencias de tipo ISI, y hacer la FFT para deshacer el efecto de la IFFT que se hizo en el transmisor.

Dado que para el transmisor ya se explicó cómo se hacían estas etapas y el porqué de cada etapa, ahora únicamente basta con decir que, en esta etapa del receptor, solo hay que tener en cuenta el número de muestras de prefijo cíclico que se introdujeron en el transmisor para eliminar el mismo número de muestras ahora en el receptor. En cuanto a la FFT lo único a tener en cuenta es realizarla con los mismos parámetros que se usaron en el transmisor para hacer la IFFT, y que así no se provoquen distorsiones.

En cuanto a su programación en MATLAB para realizar la simulación, se puede usar el mismo código que se usó en el transmisor para esta etapa, indicando simplemente que ahora no se está transmitiendo sino recibiendo, por lo que la operación que hay que realizar es la eliminación del prefijo y no su introducción. De esta forma se ahorra líneas de código y se simplifica la complejidad de los distintos códigos necesarios en la simulación.

2.2.3.2 Extracción de los datos

Para realizar la extracción de la información, primero hay que hacer una estimación del canal que se ha usado para la comunicación, para así saber qué transformaciones ha podido sufrir esa información y contrarrestarlas. Para esta simulación se ha considerado que no era necesario hacer algoritmos de estimaciones de canal, puesto que por cómo se han definido los canales son conocidos. Se ha decidido hacerlo de esta forma, puesto que el proceso de estimación de canal es un algoritmo bastante complejo y que si no es óptimo genera grandes errores en la simulación, pudiéndose llegar a pensar que el transmisor o el receptor no están funcionando bien. Como ya se sabe, este trabajo tiene como objetivo el estudio de la interferencia co-canal, por lo que no es necesario centrarse en la estimación del canal para llegar a conclusiones sobre la interferencia co-canal.

Asumiendo que se conoce el canal usado, para la etapa de extracción de datos del símbolo OFDM recibido, basta con saber dónde están colocadas las portadoras piloto y las bandas de guarda, puesto que el resto es la información que se quiere extraer.

En la simulación basta con pasarle al código del receptor el vector de portadoras piloto que se generó en el transmisor, e indicarle dónde están situadas las bandas de guarda que se generaron también en el transmisor.

2.2.3.3 Demodulador

En esta fase, al igual que en las anteriores del receptor, es realizar el paso inverso al paso de modulación realizado en el transmisor. Para esta etapa, lo único que es necesario conocer, es la modulación que se usó para la modulación de los datos para saber qué constelación aplicar para la demodulación.

En cuanto a la implementación en MATLAB, siguiendo la técnica de reducir complejidad del código, se usa el mismo programa creado para el modulador, indicando solamente, que ahora se está recibiendo y no transmitiendo para que así realice las acciones que corresponden para cada uno.

2.2.3.4 De-Interleaving

Dado que en el transmisor, en la etapa de interleaving, lo que se hace es permutar los bits con el objetivo de evitar las ráfagas de errores, ahora, para una correcta recepción de los datos, habrá que colocar esos bits que fueron permutados para que a la hora de decodificar se obtenga la secuencia correcta enviada.

Al igual que se expuso para el interleaving, en esta ocasión para el de-interleaving las dos permutaciones que hay que aplicar para saber cómo colocar los bits y generar su ordenación correcta vienen definidas con las siguientes ecuaciones:

- Primera permutación:

$$m_j = s * \text{floor}\left(\frac{j}{s}\right) + \text{mod}\left[\left(j + \text{floor}\left(\frac{12 * j}{N_{cbps}}\right)\right), s\right] \text{ donde } j = 0,1,2 \dots (N_{cbps} - 1)$$

- Segunda permutación:

$$k_j = 12 * m_j - (N_{cbps} - 1) * \text{floor}\left(\frac{12 * m_j}{N_{cbps}}\right) \text{ donde } j = 0,1,2 \dots (N_{cbps} - 1)$$

Como se puede observar, para esta etapa el parámetro que hay que conocer es N_{cbps} , que como ya se explicó, se trata del tamaño del bloque que hay que permutar. Este valor será el mismo que se use en el transmisor y vendrá definido por la Tabla 10 de la sección 2.2.1.4 de este trabajo.

2.2.3.5 Decodificación

Esta etapa como se ha visto en la Figura 21 se compone de dos etapas: Viterbi y Reed-Solomon. Esto es necesario puesto que en el transmisor se usaron dos tipos de codificación: la convolucional y la codificación Reed-Solomon.

Lo primero que hay que hacer es deshacer la codificación convolucional, puesto que en el transmisor fue la última codificación que se realizó. Para ello, se hará uso del algoritmo de Viterbi, dado que es el algoritmo usado para decodificar codificaciones convolucionales. En este trabajo no aplica contar en profundidad dicha algoritmo, por lo que simplemente se indicará que se trata de un Algoritmo Óptimo de Máxima Verosimilitud.

Para la implementación del algoritmo de Viterbi, se ha seguido de forma rígida la norma y la definición propia de los pasos de ejecución del algoritmo. Además, se ha hecho uso de la función 'vitdec' que define MATLAB para hacer la decodificación con Viterbi.

A la secuencia obtenida después de aplicar el algoritmo de Viterbi, se le realiza la decodificación con Reed-Solomon. Para realizar esta etapa, basta con saber el número de bytes antes de codificar y después de codificar, así como hacer uso de la Tabla 8 mostrada en la sección 2.2.1.1 del presente trabajo. Con estos datos el proceso de decodificación resulta un proceso sencillo.

2.2.3.6 Aleatorización

Esta etapa, última del receptor, es totalmente simétrica a la etapa de aleatorización del transmisor, puesto que el polinomio generador usado es igual para ambas etapas. También son iguales los parámetros usados en cuanto a BSID, DIUC y el número de trama que fueron explicados en la sección 2.2.1.2 de este trabajo.

2.2.4 Diseño de la interferencia co-canal

Para la generación de la interferencia co-canal, se ha modificado el código anteriormente explicado para que, en vez de crear una secuencia de información, es decir, un usuario, se creen dos secuencias de información. Con esto se consigue simular que existen dos usuarios en la misma frecuencia, por lo que el usuario que será denominado como usuario secundario será el que le haga interferencia al usuario primario. Para que las secuencias generadas estén totalmente incorreladas, se han creado ambas secuencias de forma independiente. Esto se ha conseguido en la etapa de generación de datos del transmisor, haciendo que la generación de los datos de ambas secuencias sea independiente, pero que usen la misma longitud de secuencia, la misma frecuencia y la misma modulación.

Una vez generadas las secuencias, se envían ambas secuencias por todas las etapas del transmisor de forma independiente una de otra (haciendo cada etapa para cada secuencia), y una vez ambas secuencias están listas para ser transmitidas, es decir, se han convertido a símbolos OFDM modulados y codificados, se combinan entre sí para así simular la interferencia en el usuario primario. Para hacer esta combinación, basta con hacer la suma de ambas, haciendo así que la potencia del usuario secundario interfiera en el usuario primario creando así la interferencia co-canal que se quería conseguir.

Para probar el nivel de relación señal a ruido que soporta el sistema cuando existe interferencia co-canal, se ha programado que la simulación calcule la BER (tasa de error de bit) teórica y la de la señal que se está simulando en ese momento. Para poder ver este dato y hasta cuánto soporta, para la interferencia co-canal, es decir, el usuario secundario, la persona que ejecute la simulación puede elegir el porcentaje de intensidad en % que quiere que tenga la señal interferente, con lo que se conseguirá ver la degradación que se produce en la señal recibida cuanto más porcentaje de interferencia existe. Esto fue necesario hacerlo puesto que, al hacer interferir al usuario secundario con la misma potencia que el usuario primario, se veía que la degradación del sistema era total y no se podían obtener datos concluyentes. Por este motivo, como se ha mencionado, se introdujo en la simulación la posibilidad de poder elegir los porcentajes de intensidad del usuario secundario, consiguiendo así ver la degradación progresiva de la comunicación según aumenta la interferencia.

En el siguiente apartado, se expondrán las fórmulas utilizadas para el cálculo de la BER dependiendo de la modulación y el canal que se utilice para hacer la simulación. Esta BER será un parámetro de medición para la degradación del sistema según se aumenta la interferencia co-canal.

2.2.4.1 Cálculo de la BER

En cuanto al cálculo de la BER teórica, que será la que indique cuánto se está degradando el sistema debido a la interferencia co-canal, dependiendo de la modulación y el canal que se esté usando en ese momento, habrá que aplicar una formulación u otra. De esta forma, las fórmulas que se aplicarán en la simulación para el cálculo de la BER teórica para un canal AWGN son:

- Modulación BPSK:

$$BER_{BPSK} = \frac{1}{2} * erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

- Modulación QPSK:

$$BER_{QPSK} = \frac{1}{2} * erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

- Modulación 16-QAM:

$$BER_{16-QAM} = \frac{3}{8} * erfc\left(\frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right)$$

- Modulación 64-QAM:

$$BER_{64-QAM} = \frac{7}{24} * erfc\left(\frac{1}{7} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E_b}{N_0}}\right)$$

Entre los parámetros usados en las fórmulas está el parámetro E_b/N_0 , el cual no es más que una medida de la relación señal a ruido normalizada. Dicha SNR, que será la que se use en las posteriores simulaciones, indica cuánta señal hace falta respecto al ruido existente, por tanto, cuanto más alta sea esta relación, más alto será el nivel de señal necesario.

Sin embargo, para los canales que se modelan con los modelos SUI en los que existen desvanecimientos y retrasos del canal, estas fórmulas no son válidas. Para estos casos, en los que los canales siguen desvanecimientos con distribuciones Rayleigh y Rician, la BER teórica se calculará haciendo uso de la función 'berfading' del conjunto de librerías de MATLAB. El uso de esta función es posible gracias a que está basada en codificación Gray, lo cual, es justo la codificación usada en el estándar WIMAX.

2.3 Resultados

Ahora que se ha presentado una base teórica del estándar WIMAX, y cómo se ha llevado a cabo el desarrollo del programa de simulación y cada etapa que lo compone, el siguiente paso es analizar los resultados obtenidos en función de los tipos de escenarios que se podrían dar en la vida real.

Para ello, se realizarán simulaciones en cada uno de los siete escenarios que se han presentado en la sección 2.2.2. El orden de presentación de los escenarios será de más sencillo a más complejo, por lo que se presentará en primer lugar el escenario con canal AWGN, luego canal SUI-1, SUI-2, SUI-3 y así sucesivamente hasta llegar al escenario modelado por el canal tipo SUI-6 que, a priori, es el escenario más complejo, puesto que representa un terreno montañoso con niveles de vegetación medios y altos que corresponden a condiciones de pérdidas elevadas.

Con el fin de poder analizar cómo de buena es la comunicación que se está simulando, y los beneficios que tiene usar los sistemas de codificación/decodificación que define el estándar, todas las gráficas de las simulaciones mostrarán la BER (ver sección 2.2.4) obtenida en función de la SNR. Además, se podrán apreciar tres líneas de distintos colores que serán las que marquen dicha relación de la SNR con la BER. En cada gráfica:

- La línea de color azul con trazado discontinuo marcará la BER teórica.
- La línea de color azul con trazado continuo indicará la relación BER-SNR cuando no se hace uso de las etapas de codificación/decodificación del sistema WIMAX.
- La línea de color verde con trazado continuo indicará la relación BER-SNR cuando se hace uso de las etapas de codificación/decodificación del sistema WIMAX.

Una vez se ha explicado qué y cómo serán visualizados los resultados, ahora se explicarán los parámetros utilizados para llevar a cabo el trabajo. En las simulaciones realizadas, existen parámetros comunes a todas ellas y otros parámetros característicos únicamente del escenario que se simula en cada momento, por lo que éstos deben ser ajustados de una simulación a otra. Entre los parámetros comunes a todas ellas, está el tipo de modulación, los niveles de SNR, el número de muestras que se quieren simular y el número de portadoras a utilizar. Para todas las simulaciones se ha elegido: una modulación QPSK, puesto que es la más polivalente en cuanto a distancias a la estación base, una transmisión de 100 símbolos OFDM, puesto que se observó que enviando menos símbolos los resultados obtenidos no eran lo suficientemente representativos como para realizar un buen análisis, 256 portadoras porque reduce la complejidad a la hora de la sincronización, y por último, se ha elegido una relación señal a ruido que va desde 1dB hasta los 18 dB.

En cuanto a los parámetros que he tenido que ir ajustando en función del escenario que se estaba simulando, se encuentran el prefijo cíclico y el ancho de banda de la transmisión. En los distintos apartados que se muestran a continuación, se irá indicando los valores elegidos para cada uno de estos parámetros.

Por último, destacar que como se mencionó en la sección 2.2.4, otro parámetro que ha sido necesario añadir ha sido el porcentaje de intensidad de la interferencia co-canal. Para este último parámetro, los valores elegidos para hacer las simulaciones han sido: porcentaje 0% de señal interferente, es decir, sin interferencia, un porcentaje del 10 % de señal interferente, un porcentaje del 50 % y por último una interferencia total con la señal deseada, porcentaje 100%.

Aclarado esto, empezaré con la explicación de cada una de las simulaciones realizadas.

2.3.1 Simulaciones con/sin codificar canal AWGN

La primera simulación realizada ha sido, a priori, la más simple, puesto que se trata de la simulación de un canal AWGN. Para esta simulación, de los parámetros que no son comunes a todas las simulaciones y que hay que ajustar, he elegido un ancho de banda de 12 MHz, puesto que después de hacer diversas pruebas con distintos anchos de banda, observé que este valor no afectaba a la mejor o peor respuesta del sistema. Como el canal AWGN es el canal más simple, tomando como valor de partida para las simulaciones un ancho de banda de 12MHz, según se vayan complicando los canales este valor habrá que ir reduciéndolo.

En cuanto al valor del prefijo cíclico, como ya he mencionado, al tratarse en esta simulación de un canal muy simple, no es necesario añadir mucho prefijo cíclico, por lo que he decidido fijar el valor inicial en 8 muestras, lo que equivale a una tasa de 1/32. Como se verá en este caso concreto, conforme la intensidad de la interferencia co-canal se vaya incrementando, este prefijo cíclico no será necesario aumentarlo, puesto que después de realizar diversas pruebas se comprobó que no se obtenía mejoría. Este fenómeno no tiene porqué pasar en las otras simulaciones del resto de canales.

A continuación muestro los resultados obtenidos cuando para el canal AWGN se introduce un porcentaje de intensidad de interferencia co-canal del 0%, 10%, 50% y 100%

2.3.1.1 Simulación canal AWGN sin interferencia co-canal

En la simulación mostrada en este apartado, se ha realizado una transmisión WIMAX a través de un canal AWGN y con un porcentaje de interferencia co-canal del 0%, es decir, en este caso no existirá interferencia de este tipo. Dado que no existe interferencia co-canal, cabe esperar que la simulación sea la mejor que se puede obtener para este tipo de canal si es comparada con posteriores simulaciones, donde sí se introducirá interferencia.

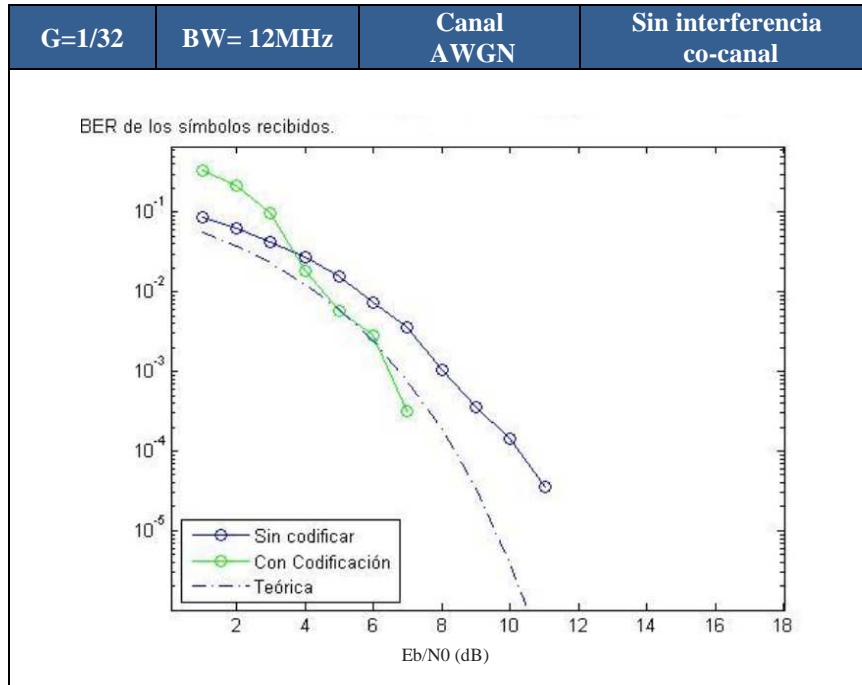
Los parámetros elegidos en este caso son:

- Canal AWGN
- Modulación QPSK
- Prefijo cíclico de 8 muestras ($G=1/32$ donde G indica la relación de tamaño del prefijo cíclico)
- Ancho de banda nominal de 12 MHz
- Porcentaje de interferencia co-canal del 0%
- Envío de 100 símbolos OFDM

Cabe aclarar que, como se ha mencionado, debido a que esta es la primera simulación del trabajo realizado, el valor del ancho de banda se ha elegido de forma aleatoria entre los que la norma permite, puesto que se comprobó que no se obtenían ni mejores ni peores resultados que con otro valor, ya que el ancho de banda va relacionado con el prefijo cíclico y con el periodo de símbolo del canal que se esté simulando, y dado que ésta será la simulación de partida para comparar con el resto, no era un dato importante.

Una vez fijado el ancho de banda a un valor, lo que sí es importante es determinar un valor de prefijo cíclico en función de dicho ancho de banda y el canal utilizado. Como se ha mencionado anteriormente, se ha estimado que con introducir 8 muestras en más que suficiente para este caso.

Ahora que están aclarados los parámetros de partida que se van a utilizar, a continuación muestro la gráfica obtenida (Gráfica 1):



Gráfica 1: Simulación canal AWGN sin interferencia co-canal

En la gráfica obtenida, al igual que pasará con el resto de gráficas de este trabajo, se muestra una comparación de la tasa de error de bit (BER) en función de la relación señal a ruido.

Como se puede observar, en la simulación en la que no se hace uso de las etapas de codificación (línea azul), se obtienen peores resultados que cuando sí se usan, ya que como se puede apreciar, para conseguir una $BER < 10^{-5}$ es necesario una relación señal a ruido mayor, de prácticamente 10 dB. Sin embargo, cuando se hace uso de todas las etapas de codificación que especifica la norma (etapa de codificación Reed Solomon y etapa de codificación convolucional), se obtiene una $BER < 10^{-5}$ con tan solo una relación señal a ruido de 7 dB. Por lo que se concluye que para este caso, se han obtenido los resultados esperados.

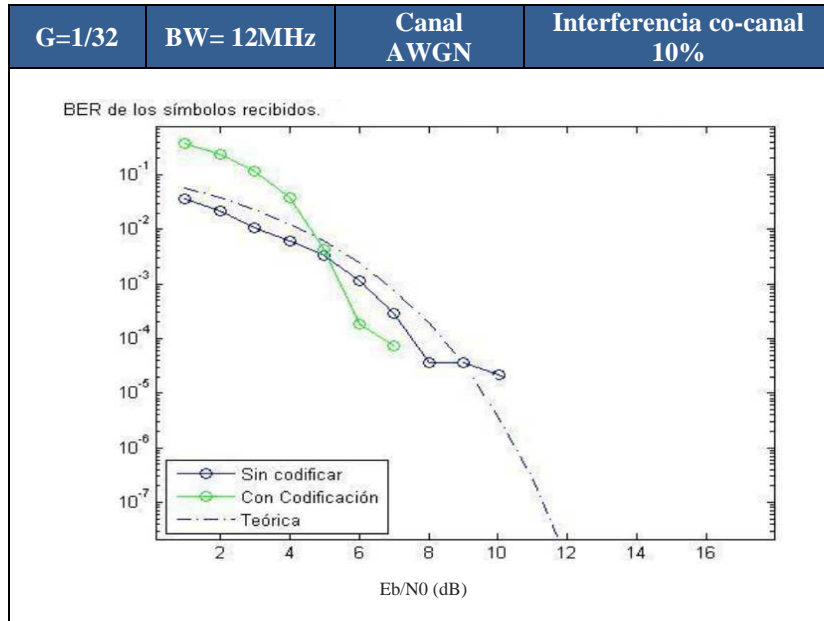
Como posible peculiaridad que se observa en ésta y en el resto de simulaciones realizadas, es que cuando la relación señal a ruido es pequeña, la BER es mayor (y por tanto peor), al usar codificación que cuando no se hace uso de ella. Esto puede ser debido a que cuando se codifica, la primera etapa de ésta, es la aleatorización. Dicha etapa como se contó en la sección 2.2.1.2, se basa en un registro, el cual hay que inicializar y necesita un tiempo para obtener resultados óptimos. Por ello, según el sistema se estabiliza, el sistema se va haciendo más óptimo y se observa que al codificar, aunque empieza con una BER peor, al final se obtienen mejores resultados que cuando no se aplica.

2.3.1.2 Simulación canal AWGN con porcentaje de interferencia co-canal al 10%

En la siguiente gráfica (Gráfica 2), los parámetros usados para la simulación son los mismos que los especificados en la sección principal de este subapartado, pero en esta ocasión, se introduce en la comunicación la interferencia co-canal para ver qué efectos provoca en comparación con el caso anterior en el que no existía dicha interferencia. Para este caso, se ha elegido un porcentaje de interferencia co-canal de 10%. La explicación del porqué elegir este porcentaje, es que es un porcentaje de interferencia co-canal suficiente para que produzca efectos negativos en la comunicación, pero sin que estos sean excesivos para así, poder comparar una comunicación sin interferencia co-canal con una transmisión en la que existe, aunque sea de manera mínima. En posteriores simulaciones, se irá introduciendo más porcentaje de interferencia co-canal con el fin de ver hasta dónde puede llegar el sistema sin degradar la señal hasta un punto que no sea recuperable.

En cuanto a los parámetros utilizados, después de hacer comprobaciones ajustando el ancho de banda y el prefijo cíclico, se observó que no se obtenían mejoras con dichas modificaciones con lo que se ha decidido utilizar los mismos parámetros que en la simulación anterior. Esto supone una ventaja puesto que así la comparación será, por así decirlo, en igualdad de condiciones.

Una vez dicho esto, a continuación se muestra la gráfica obtenida (Gráfica 2) para la simulación de un canal AWGN con un porcentaje de interferencia co-canal del 10%:



Gráfica 2: Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 10%

Como se puede observar, la gráfica obtenida es muy similar a la que se obtuvo en el anterior subapartado, donde se simuló el mismo canal pero sin interferencia co-canal.

La única diferencia que se aprecia comparándola con la gráfica obtenida del canal AWGN sin interferencia co-canal, es que al introducir un pequeño porcentaje de interferencia co-canal, la simulación que no utiliza las etapas de codificación del sistema empeora ligeramente, puesto que, ahora, para obtener el mismo nivel de BER es necesaria una SNR de 11 dB, es decir, necesita 1 dB más de la SNR que en el caso anterior para obtener resultados similares.

En cuanto a la simulación cuando se hace uso de las etapas de codificación del sistema, no se aprecian diferencias respecto a la gráfica del canal AWGN sin interferencia co-canal, puesto que se obtienen niveles de BER parecidos para las mismas SNR que en la gráfica del subapartado anterior.

Con estos resultados, se puede concluir que, cuando se está ante un canal del tipo AWGN, cuando se introducen unos pequeños porcentajes de interferencia co-canal, si en la transmisión se hace uso de las etapas de codificación, queda comprobado que éstas protegen la señal y hace que la comunicación no sufra degradación, mientras que si no se usa ningún tipo de codificación, a pesar de que el porcentaje de interferencia co-canal sea pequeño, empieza a producirse empeoramiento de la comunicación, por lo que el sistema es menos robusto ya que con una mínima interferencia sufre degradación.

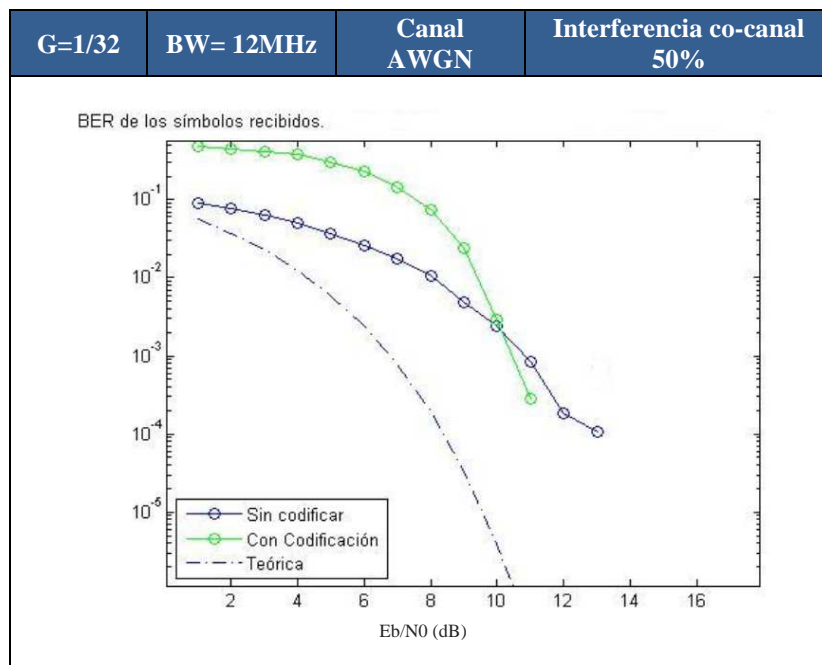
En función de dichos resultados, para este tipo de canal, cabe esperar que según se vaya aumentando el porcentaje de interferencia co-canal, para simulaciones codificadas, el sistema sufra una mínima degradación, mientras que para simulaciones sin codificación, el sistema se degrade de forma importante a pesar de ser porcentajes de interferencia no muy grandes. Esto se verá en los dos siguientes subapartados de esta sección.

2.3.1.3 Simulación canal AWGN con porcentaje de interferencia co-canal al 50%

La siguiente simulación que se va a realizar se ha elegido que tenga un porcentaje de interferencia co-canal del 50%, puesto que se quiere observar cómo afecta a la comunicación cuando el porcentaje de interferencia empieza a ser elevado y no tan bajo como en la simulación del subapartado anterior.

Para esta ocasión, como pasó con las anteriores simulaciones, se ha elegido no variar ni el ancho de banda ni el prefijo cíclico puesto que, para el canal que se está usando, no se producían mejorías al variar dichos parámetros. Con esto se consigue que las comparaciones con las anteriores gráficas obtenidas, al ser con igual prefijo cíclico y con igual ancho de banda, se vean exclusivamente los efectos de la interferencia co-canal ya que es el único valor que se ha modificado.

La gráfica obtenida (Gráfica 3) para los parámetros mencionados fue:



Gráfica 3: Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 50%

En esta ocasión, dado que el porcentaje de interferencia co-canal empieza a ser elevado, sí se aprecia una degradación tanto para la señal codificada como para la no codificada.

Para empezar, se observa que los mejores valores de BER obtenidos en esta ocasión son peores que los que se obtuvieron en anteriores simulaciones, puesto que ahora existe un nivel de BER de alrededor de 10^{-4} mientras que antes se obtenían valores de hasta 10^{-5} , o lo que es lo mismo, para un porcentaje de interferencia mayor, no se puede obtener ni codificando, la misma tasa de errores que cuando la interferencia era menor.

Añadido a este fenómeno, se observa también que para obtener esos niveles de BER, que como he mencionado anteriormente, a pesar de ser peores que los obtenidos en otras simulaciones son los más óptimos que se han podido obtener para esta simulación,

ahora es necesario tener mayor relación señal a ruido en la comunicación. Esto se puede ver porque en esta gráfica (Gráfica 3), haciendo foco en la transmisión codificada, son necesarios 11 dB de relación señal a ruido (SNR), mientras que antes únicamente hacían falta 7 dB, por lo que se produce una degradación apreciable. En cuanto a la señal no codificada, se puede ver que el fenómeno se repite, es decir, que antes eran necesarios 11 dB y ahora son necesarios 13 dB de relación señal a ruido para conseguir un nivel de BER de 10^{-4} . Además, se observa que para simulaciones reales como las que estoy realizando, para una interferencia co-canal del 50%, no es posible obtener valores por debajo de la BER teórica como pasaba cuando la interferencia co-canal es pequeña, es decir, se necesita más relación señal a ruido que la teórica esperada para conseguir los mismos resultados.

Otra peculiaridad que se aprecia en la gráfica, es que la simulación codificada para niveles de SNR pequeños da peores resultados de BER que cuando la señal no está codificada. Este efecto fue comentado en la gráfica (Gráfica 2) de la anterior simulación, y como se explicó en su momento, es debido al proceso de aleatorización que se realiza en codificador. A pesar de esto, la señal codificada converge y siempre da mejores resultados que los que puede dar una transmisión sin codificar puesto que obtiene niveles de BER similares utilizando menos relación señal a ruido.

Con estos resultados, se puede concluir que a pesar de que el porcentaje de interferencia empieza a ser importante, el sistema soporta la degradación de forma aceptable y que con los datos que muestran las gráficas, con porcentaje de interferencia del 50%, la comunicación todavía sería posible con unos niveles de calidad aceptables.

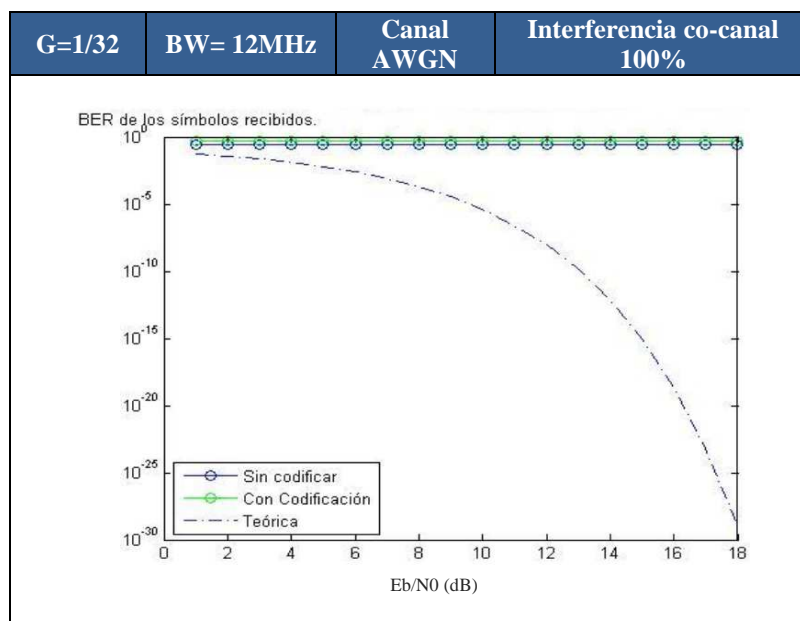
2.3.1.4 Simulación canal AWGN con porcentaje de interferencia co-canal al 100%

Con todo lo explicado hasta ahora sobre el canal AWGN, lo último que me queda es comprobar qué le pasa al sistema cuando el porcentaje de interferencia co-canal es del 100%, es decir, interfiere por completo con la señal de información deseada.

Para este caso, se ha hecho lo mismo que en las anteriores simulaciones, pero después de hacer diversas pruebas, se observó que modificando el ancho de banda o el prefijo cíclico no se obtenían mejores resultados por lo que se ha decidido no variarlos.

Dado que en la anterior simulación cuando el porcentaje de interferencia era del 50% se apreciaba degradación del sistema, cabe esperar que para un porcentaje de interferencia máximo, como en esta ocasión, la degradación sea muy grande. Dicho esto, a donde realmente quiero llegar es a saber si a pesar de ser grande, se podría determinar que puede haber comunicación con unos mínimos niveles de calidad.

A continuación se muestra la gráfica obtenida (Gráfica 4):



Gráfica 4: Simulación canal AWGN con porcentaje interferencia co-canal 100%

Viendo la gráfica obtenida, no queda mucho que explicar. Como se puede ver la tasa de BER obtenida para cualquier relación señal a ruido es la peor que se puede obtener, es decir, BER de valor 1, lo que quiere decir que todo lo que se recibe contiene errores.

Con estos resultados, se concluye que la degradación del sistema es absoluta y, que se codifique o no es indiferente, puesto que hay tal degradación que ni la codificación consigue contrarrestarla.

Para finalizar con el análisis del sistema WIMAX sobre canal AWGN cuando existe interferencia co-canal, se hicieron pruebas para porcentajes de interferencia co-canal entre 50% y 100% y se vio que el porcentaje máximo de interferencia que acepta el sistema es de 75% , puesto que con ese porcentaje sufre una degradación que empieza a comprometer la comunicación dado que exige una relación señal a ruido demasiado grande y difícil de conseguir, además de que la desviación sobre la simulación teórica es aún peor que con el 50% de interferencia.

2.3.2 Simulaciones con/sin codificar canal SUI-1

En este tipo de simulación se usará el canal SUI-1, que pertenece como se mencionó en la sección 2.2.2.3, a un modelo de canal tipo C, en el que el escenario simulado presenta una orografía plana y con un nivel de vegetación bajo o nulo, por lo que los obstáculos del escenario no serán muy representativos en la simulación. Se presenta un escenario de bajas pérdidas.

Para obtener una simulación lo más óptima posible, se ha elegido de nuevo simular el envío de 100 símbolos OFDM, pero debido a las características del canal, ha sido necesario ajustar el prefijo cíclico a un valor de 0.0625, es decir, a 1/16. Como se explicó en la sección 2.2.1.7, dependiendo del escenario y por tanto, del tipo de canal que se use para la simulación, el retraso que produce el canal varía. Para compensar dicho retraso, el prefijo cíclico también tiene que variar introduciéndose mayor número de muestras cuanto mayor sea el retraso que introduce el canal. En este caso, al tratarse de un canal que simula un escenario plano con vegetación escasa, el retraso que introducirá el canal será escaso, por lo que con un prefijo cíclico de 0.0625 o lo que es lo mismo, de 16 muestras, será suficiente para evitar la interferencia ISI de la simulación.

En cuanto al ancho de banda elegido, se ha observado que para este escenario no era necesario modificarlo respecto al usado en el apartado anterior, puesto que se ha comprobado que cambiándolo no suponía una gran mejoría y se ha decidido dejarlo en un ancho de banda de 12 MHz.

Las simulaciones serán distribuidas como se hizo en el apartado anterior, es decir, se simulará la comunicación cuando no existe interferencia, cuando existe un porcentaje de interferencia (del 10%), cuando el porcentaje de interferencia es del 50% y por último, un porcentaje de interferencia del 100%, es decir, cuando ambas señales se interfieren por completo.

Por tanto, los parámetros usados de forma inicial para la simulación del canal SUI-1 son:

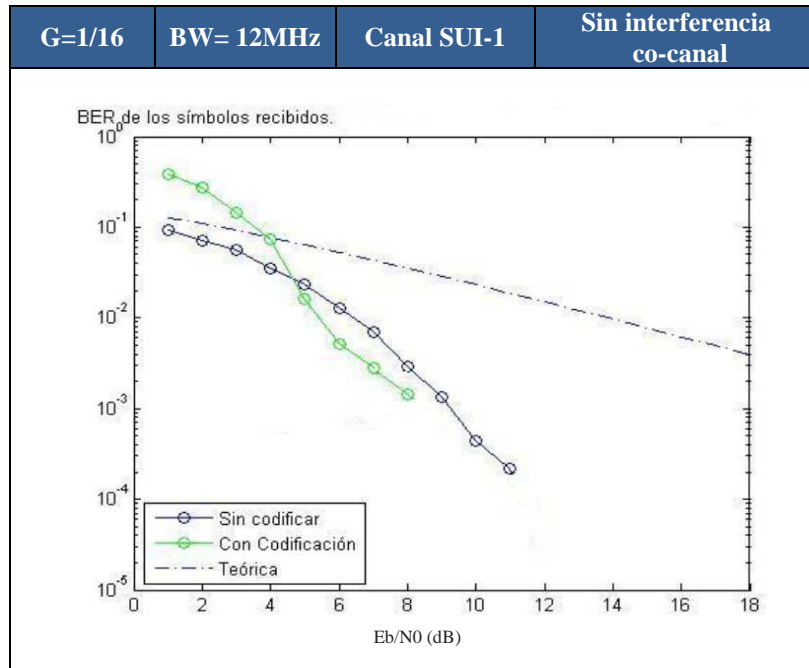
- Canal SUI-1
- Modulación QPSK
- Prefijo cíclico de 16 muestras ($G=1/16$)
- Ancho de banda nominal de 12 MHz
- Envío de 100 símbolos OFDM

Dicho esto, empezaré con el análisis del sistema WIMAX cuando existe interferencia co-canal utilizando un canal tipo SUI-1.

2.3.2.1 Simulación canal SUI-1 sin interferencia co-canal

Como ya se hizo con el análisis del canal AWGN, en esta ocasión, también se empezarán las simulaciones usando el canal SUI-1 sin introducir interferencia co-canal, para así poder comparar cómo va afectando a la comunicación los distintos porcentajes de interferencia que se irán introduciendo.

Con los parámetros de partida indicados en el apartado principal de esta subsección, sin introducir interferencia co-canal, la gráfica obtenida (Gráfica 5) es la mostrada a continuación:



Gráfica 5: Simulación canal SUI-1 sin interferencia co-canal

Una de las primeras observaciones que se pueden hacer y que se repite, al igual que pasaba con el canal AWGN, es que cuando la SNR es baja, la simulación usando codificación es peor que la de sin codificar, pero como se explicó en la sección anterior, esto se debe a la etapa de aleatorización que está dentro de la codificación. Una vez que el sistema se estabiliza, al igual que pasaba con el canal AWGN, la comunicación es mejor cuando se codifica, puesto que converge antes para valores menores de SNR.

Analizando la gráfica, se observa que cuando se codifica, la simulación converge con tan solo 8 dB de relación señal a ruido, mientras que sin codificar necesita llegar a los 11 dB de relación señal a ruido. Sin embargo, los resultados interesantes y sorprendentes de esta gráfica se observan si se hace foco en los valores de BER que se obtienen, ya que se observa que aunque para la señal codificada se necesita menos SNR, el valor de BER obtenido es de 10^{-3} , la cual es una calidad aceptable y recomendable por el estándar, pero cuando no se codifica se obtiene una BER un poco mejor, a costa eso sí, de necesitar una relación señal a ruido mayor.

Otro punto a destacar, es que en el caso de no existir interferencia co-canal, los resultados obtenidos son mejores incluso que los que se obtendrían teóricamente, puesto

que como se puede ver en la gráfica, las simulaciones realizadas se encuentran por debajo de la línea que representa la BER teórica, lo que quiere decir que esta simulación presenta una mejor relación SNR-BER que la que se podría esperar, por lo que se concluye que la simulación es la óptima.

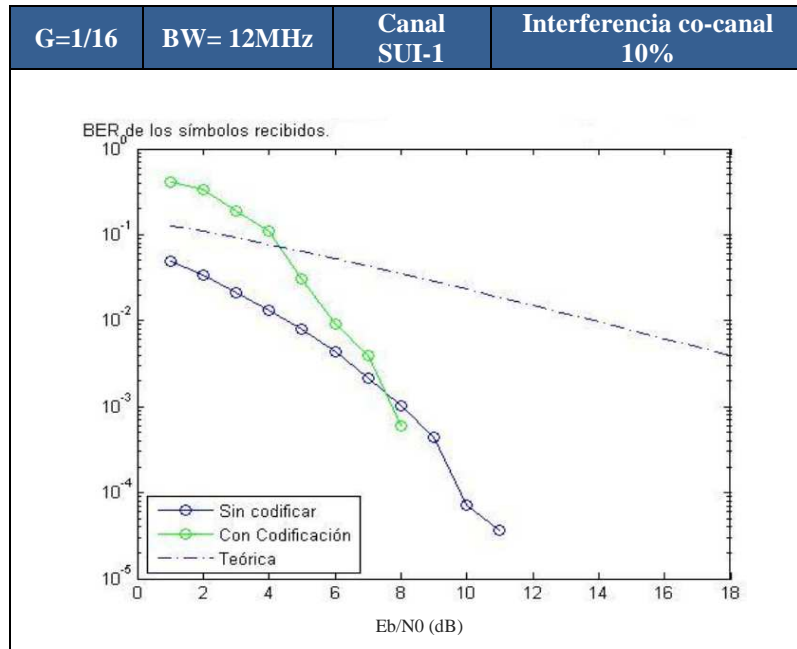
Como conclusión a este apartado, decir que, a pesar de estos resultados en los que la señal codificada solo obtiene una BER de 10^{-3} , dado que la señal codificada está dentro de los límites de BER que permiten una buena comunicación, se recomendaría usar, puesto que siempre se obtiene un sistema más robusto cuando se codifica y es más, el nivel de señal a ruido exigido sería menor.

2.3.2.2 Simulación canal SUI-1 con porcentaje de interferencia co-canal al 10%

Partiendo de que se considerará óptima la simulación anterior del canal SUI-1, ya que en esa simulación no se introduce interferencia co-canal, a continuación se introducirá al sistema una pequeña interferencia co-canal (porcentaje de intensidad del 10%), como se hizo en las simulaciones del canal AWGN, para ver cómo va afectando la interferencia en este caso, con el canal SUI-1.

Para esta simulación, después de ver si era necesario modificar el prefijo cíclico o el ancho de banda para conseguir mejores resultados, se ha visto que realmente no era necesario, puesto que los resultados apenas mejoraban, así que se ha decidido mantener los mismos parámetros que en la simulación anterior.

La gráfica obtenida (Gráfica 6) ha sido:



Gráfica 6: Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 10%

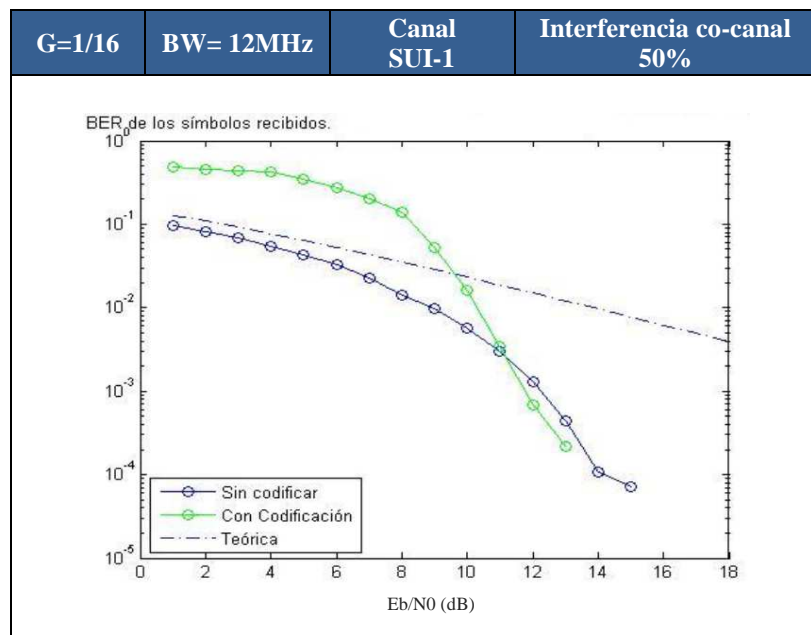
Como se puede observar, al introducir una pequeña interferencia co-canal en la transmisión con canal SUI-1, se obtiene una comunicación con la misma calidad que cuando no existe interferencia, ya que tanto los niveles de relación señal a ruido como los niveles de BER son prácticamente los mismos que en la simulación que se hizo sin interferencia co-canal. Esto ocurre tanto cuando se usa las etapas de codificación como cuando no.

Dado que el sistema para este tipo de canal ha soportado muy bien la interferencia (aunque fuera pequeña), si se compara con la simulación sin interferencia, poco más se puede añadir, tan solo indicar que, como se puede ver, si se compara con la BER teórica, se obtienen mejores resultados que los teóricos, puesto que tanto la transmisión codificada como la sin codificar se encuentran por debajo de dicha línea, lo que demuestra que la relación SNR-BER obtenida es mejor que la teórica.

2.3.2.3 Simulación canal SUI-1 con porcentaje de interferencia co-canal al 50%

Una vez se ha visto cómo reacciona el sistema a un canal SUI-1 y cómo afecta un pequeño porcentaje de interferencia co-canal, a continuación se va a analizar qué ocurre a la transmisión según aumenta la interferencia co-canal. Para ello se analizará, como se hizo para canal AWGN, el caso en el que el porcentaje de interferencia co-canal es del 50%.

Al igual que se ha hecho en todas las simulaciones, después de analizar si era necesario ajustar el ancho de banda o el prefijo cíclico, de nuevo, tampoco ha sido necesario modificarlo respecto a los parámetros usados en la primera simulación del canal SUI-1.



Gráfica 7: Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 50%

Como se puede ver en la gráfica mostrada (Gráfica 7), en esta ocasión, la interferencia co-canal sí empieza a afectar a la comunicación, puesto que para obtener niveles de BER similares a los óptimos, se requiere un nivel de SNR mucho mayor que en anteriores simulaciones. Cuando, anteriormente, se requerían para la transmisión codificada una SNR de 8 dB, ahora la transmisión ha sufrido un deterioro considerable y para obtener la misma BER es necesario una SNR de 13 dB, lo cual supone una diferencia considerable, puesto que se tratan de 5 dB. Al igual pasa en la transmisión sin codificar: cuando no existía interferencia co-canal o ésta era pequeña, para obtener una BER de en torno 10^{-4} se requería una SNR de 11 dB mientras que ahora, para el mismo nivel de BER hace falta una SNR de 15 dB, lo que supone un deterioro de 4 dB.

A pesar de estos resultados, tanto la transmisión codificada como sin codificar sigue siendo mejor que la calculada teóricamente, puesto que, como se puede ver en la gráfica (Gráfica 7), ambas líneas se encuentran por debajo de la línea de la BER teórica. Además, como cabe esperar, la transmisión codificada aunque ha empeorado, sigue siendo mejor que la no codificada.

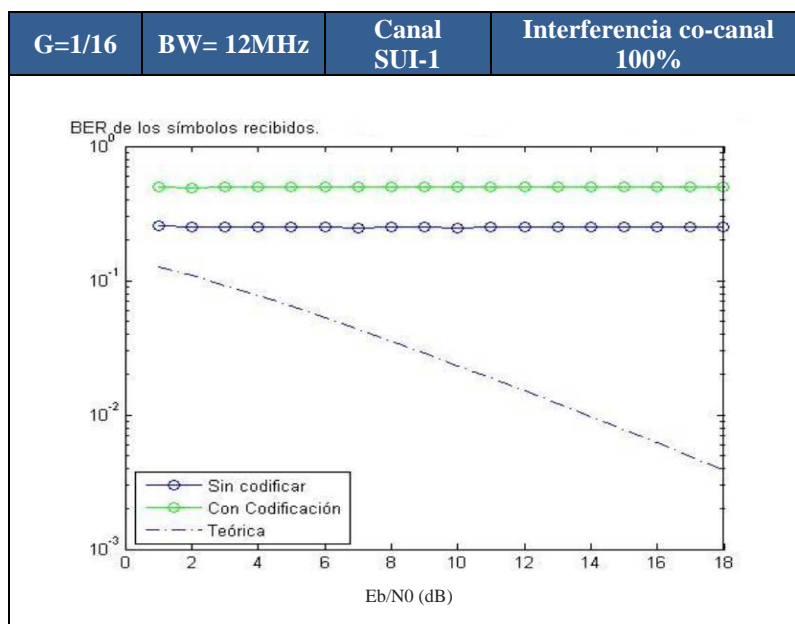
Con estos resultados, se puede concluir que sigue siendo mejor usar las etapas de codificación, puesto que asegura un sistema más robusto y hace que se requiera menos SNR para obtener niveles de BER similares que cuando no se usa la codificación. Además, a pesar de que el porcentaje de interferencia co-canal empieza a ser alto, el sistema todavía soporta la degradación con niveles aceptables de calidad, ya que se trata de niveles de BER de 10^{-4} y se están consiguiendo simulaciones mejores que la teórica. Este resultado es muy importante, puesto que si se compara con el obtenido para el canal AWGN con un porcentaje de interferencia co-canal del 50%, se observa que los niveles de BER para ambos canales están en torno a los mismos resultados, sin embargo, el canal AWGN obtiene peores resultados que sus respectivos teóricos, lo que supone que el sistema ha soportado peor la degradación, para el mismo porcentaje de interferencia co-canal, que el canal SUI-1.

2.3.2.4 Simulación canal SUI-1 con porcentaje de interferencia co-canal al 100%

Para finalizar con el análisis del canal SUI-1, se realizará la última simulación que consistirá en introducir al sistema una interferencia co-canal con porcentaje del 100%, es decir, la interferencia interfiere completamente con el usuario que se está estudiando.

Dado que la interferencia es altísima, cabe esperar, al igual que pasó con el AWGN, que la calidad de la comunicación sea pésima y no sea posible la comunicación, a pesar de eso, se comprobará.

La gráfica obtenida (Gráfica 8) ha sido la siguiente:



Gráfica 8: Simulación canal SUI-1 con porcentaje interferencia co-canal 100%

Como ya se mencionó, el resultado se confirma, puesto que para cualquier nivel de SNR el nivel de BER es de valor casi 1, es decir, prácticamente solo se reciben errores y la gráfica no se ajusta a la teórica. Se aprecia que, aunque la señal se codifique, en este caso da igual, el sistema no soporta la degradación y la comunicación se hace imposible.

Para finalizar con el análisis del canal SUI-1, como se vio que para un porcentaje de interferencia del 50% el sistema soportaba aún muy bien la degradación, se ha ido aumentando la interferencia para ver hasta que % de interferencia soportaba el sistema, y para el caso de este canal, el porcentaje conseguido es de alrededor del 70%, puesto que a partir de ese porcentaje, la señal se desvía de la teórica y los niveles de BER no aseguran una comunicación con niveles aceptables.

2.3.3 Simulaciones con/sin codificar canal SUI-2

Otro modelo de canal también enmarcado en el modelo SUI tipo C, es el modelo de canal SUI-2. Este canal, al pertenecer al igual que el canal SUI-1 al tipo C, como se mencionó anteriormente, representa un escenario con orografía plana y un nivel de vegetación bajo. La diferencia entre el canal SUI-1 y SUI-2 viene de la elección de los parámetros para modelarlo, ya que aunque representan el mismo tipo de escenario, el factor K o por ejemplo la frecuencia Doppler que se usa para modelarlos es ligeramente distinta, por lo que los resultados que se obtendrán no van a ser los mismos que para el canal SUI-1, por ello hay que analizarlo también. Para ver los parámetros y así notar las diferencias entre un canal y otro ver Tabla 16 y Tabla 17.

Dado que, a pesar de que ambos presentan parámetros algo distintos para su modelado, al fin y al cabo representan un escenario similar, después de analizar la simulación con distintos anchos de banda y prefijos cíclicos, se llegó a la conclusión de que tan solo hacía falta ajustar ligeramente el ancho de banda para obtener unos resultados lo más óptimos posible. El tener que ajustar el ancho de banda es debido a que las frecuencias Doppler que define un canal y otro no es la misma, como puede verse en las tablas arriba mencionadas. Para el canal SUI-2 el efecto de las frecuencias Doppler es mayor que para el canal SUI-1. Por tanto, los parámetros elegidos para realizar la simulación son:

- Canal SUI-2
- Modulación QPSK
- Prefijo cíclico de 16 muestras ($G=1/16$)
- Ancho de banda nominal de 10 MHz
- Envío de 100 símbolos OFDM

Al usar los mismos parámetros, la comparación con el canal SUI-1 será más fácil puesto que las diferencias detectadas no podrán ser achacadas a que se están usando otros parámetros, sino que serán debidas a la definición que los modelos SUI hacen del canal.

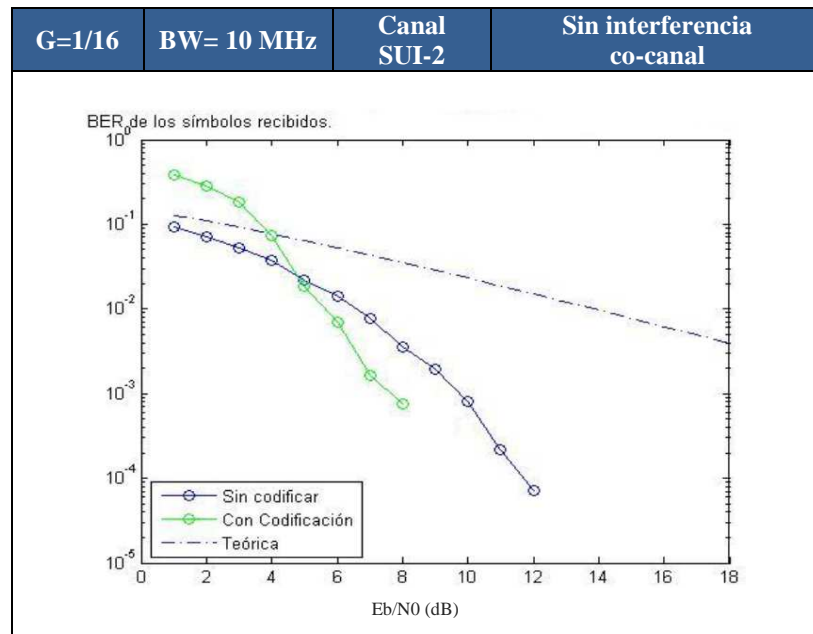
Como se ha hecho en los anteriores apartados, se simulará la comunicación cuando no existe interferencia co-canal, cuando empieza a existir aunque sea con un porcentaje pequeño como es el del 10%, cuando empieza a aumentar dicho porcentaje de interferencia hasta el 50 % y finalmente se analizará el caso en el que el porcentaje de interferencia es total para comprobar si con este modelo la comunicación sería posible o, al igual que ha pasado en anteriores casos, se hace imposible.

Una vez aclarado como se hará la simulación, qué parámetros se usarán y su por qué, empezaré con el análisis del comportamiento del sistema WIMAX cuando existe interferencia co-canal.

2.3.3.1 Simulación canal SUI-2 sin interferencia co-canal

Al igual que se hizo en los anteriores análisis, se comienzan las simulaciones sin introducir interferencia co-canal para ver, simplemente, cómo reacciona el sistema cuando el canal utilizado es del tipo SUI-2. Una vez se tengan estos resultados, se compararán con los obtenidos al ir introduciendo distintos porcentajes de interferencia co-canal.

Con los parámetros de partida indicados en el apartado principal de esta subsección, sin introducir interferencia co-canal, la gráfica obtenida (Gráfica 9) es la mostrada a continuación:



Gráfica 9: Simulación canal SUI-2 sin interferencia co-canal

Comparando la gráfica obtenida para este canal con la gráfica que se mostró para el canal SUI-1 sin interferencia co-canal (Gráfica 5), se observa que los resultados obtenidos son muy similares, puesto que los niveles de BER conseguidos respecto a los niveles de la relación señal a ruido son prácticamente iguales.

Tan solo existe una diferencia entre una gráfica y otra, y es que en esta ocasión, cuando la transmisión no se codifica, en vez de obtener una BER de 10^{-4} con una SNR de 11 dB, aquí se necesita 1 dB más, es decir, 12 dB para llegar a dicho valor. En cuanto a la transmisión codificada no se aprecian diferencias.

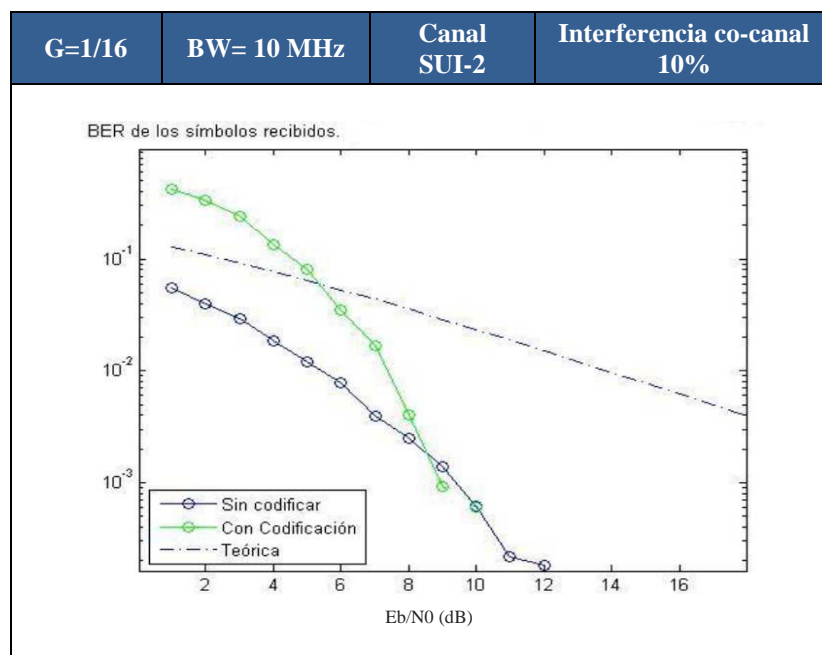
Que ambas gráficas sean similares es debido a que ambos canales modelan el mismo tipo de escenario, un escenario con orografía plana y baja vegetación. Como ya se explicó, ambos canales tan solo se diferencian en que, aunque modelan el mismo escenario, los parámetros para modelar un canal y otro son ligeramente distintos en cuanto al retraso que introducen, pero esta diferencia es tan pequeña que se ha podido compensar modificando ligeramente el ancho de banda sin necesidad de tener que aumentar el prefijo cíclico, lo cual hubiera generado un aumento en la cantidad de información a enviar.

2.3.3.2 Simulación canal SUI-2 con porcentaje de interferencia co-canal al 10%

Tomando como base la simulación realizada anteriormente donde no existía interferencia co-canal y, por tanto, donde se ha podido analizar cómo afecta el canal elegido a la comunicación, a continuación se va introducir un pequeño porcentaje de interferencia co-canal.

Como se ha visto en anteriores simulaciones, el porcentaje de interferencia co-canal volverá a ser del 10% para así poder comparar los resultados con el canal SUI-1 y ver si ocurre lo mismo que cuando no existe interferencia co-canal, es decir, que los resultados obtenidos con el canal SUI-1 y con el canal que se está estudiando son similares.

A continuación se muestra la gráfica obtenida (Gráfica 10) para un canal SUI-2 con porcentaje de interferencia co-canal al 10%:



Gráfica 10: Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 10%

Para empezar el análisis, lo primero que se observa es que los niveles de calidad de la comunicación son más que aceptables, puesto que se obtienen niveles de BER menores a 10^{-3} . Haciendo foco en la simulación teórica, las simulaciones empíricas obtenidas tanto codificando como sin codificar son mejores, puesto que se encuentran por debajo de la línea teórica, lo que indica que la relación BER-SNR de las simulaciones hechas es mejor, ya que se necesita menos nivel de SNR para conseguir los mismos valores de BER.

Comparando la gráfica obtenida sin introducir interferencia co-canal (Gráfica 9) con ésta, se observa que se ha producido una pequeña degradación en la transmisión codificada, puesto que obtiene los mismos valores de BER que antes, pero ahora necesita una SNR de 9 dB, cuando antes con 8 dB era suficiente, dicho esto, aclarar que esta diferencia no es tampoco una gran degradación que vaya a provocar que la comunicación sea mucho peor.

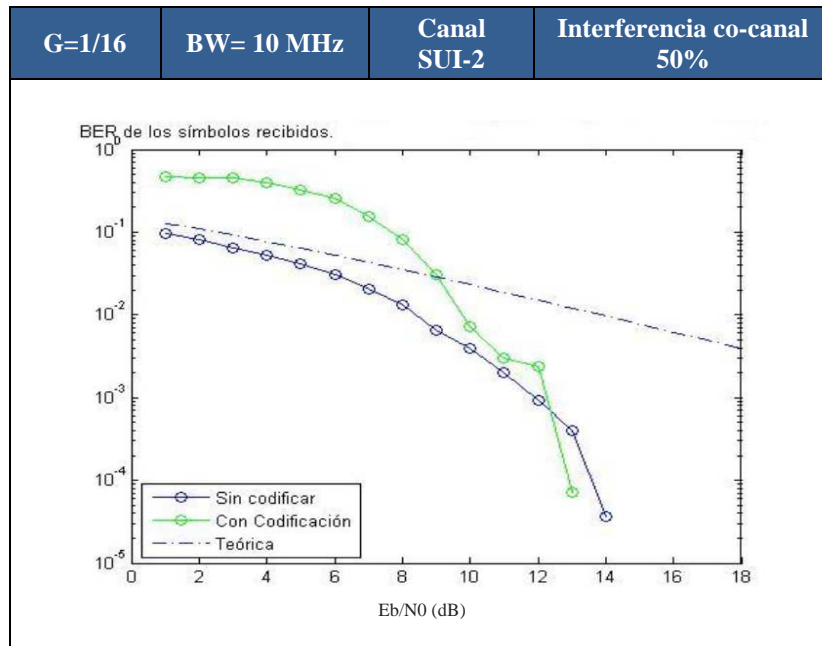
Si ahora se compara esta gráfica (Gráfica 10) con la que se obtuvo cuando se simuló el canal SUI-1 con porcentaje de interferencia al 10% (Gráfica 6), se observa de nuevo que la relación BER-SNR de una gráfica y otra es prácticamente igual y tan solo difieren que el canal SUI-2 necesita 1 dB de relación señal a ruido, tanto en la señal codificada como sin codificar, para obtener los mismos valores de BER. Esto puede ser debido a las pequeñas diferencias que existen en los parámetros que definen un canal y otro, como se ha comentado anteriormente.

Se concluye por tanto, que al igual que pasaba en anteriores canales, cuando el porcentaje de interferencia co-canal es pequeño, el sistema soporta muy bien la degradación y apenas la hace perceptible, siendo más robusto siempre usando las etapas de codificación que define el estándar que no usándolas, puesto que se obtienen niveles de BER iguales requiriendo menos relación señal a ruido.

2.3.3.3 Simulación canal SUI-2 con porcentaje de interferencia co-canal al 50%

Una vez analizado el caso en el que existe un pequeño porcentaje de interferencia co-canal, se ha ido introduciendo en la comunicación más interferencia hasta alcanzar un porcentaje de interferencia co-canal del 50% para ver cómo reacciona el sistema.

La gráfica obtenida (Gráfica 11) para dicho porcentaje de interferencia co-canal es:



Gráfica 11: Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 50%

Observando la gráfica (Gráfica 11), a pesar de estar hablando de un porcentaje de interferencia bastante alto, la comunicación sigue presentando niveles aceptables de calidad, puesto que la BER se mantiene por debajo de 10^{-4} y está dentro de la simulación teórica.

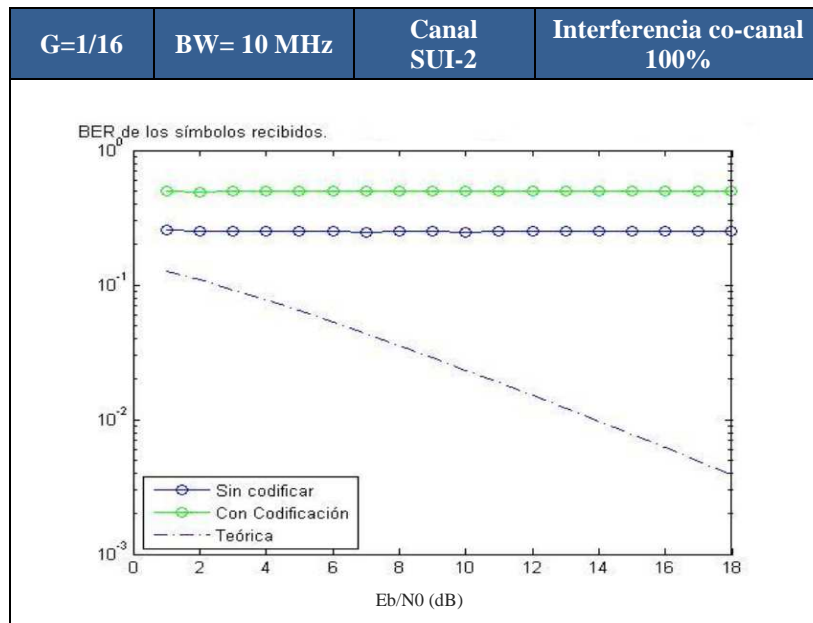
Aún así, se aprecia una degradación en la comunicación, puesto que para conseguir los mismos valores de BER ahora es necesaria mayor relación señal a ruido. Si se hace foco en la transmisión codificada, de los 9 dB que hacían falta para conseguir ese nivel de BER ahora harían falta 13 dB, lo que supone una SNR de 4 dB más. En cuanto a la transmisión sin codificar, cuando el porcentaje de interferencia era del 10%, para conseguir los mismos niveles de BER hacían falta 13dB cuando ahora es necesaria una SNR de 14dB.

Visto esto, si ahora se compara esta gráfica (Gráfica 11) con la obtenida para el canal SUI-1 con un porcentaje de interferencia del 50% (Gráfica 7), se aprecia que las gráficas vuelven a ser prácticamente iguales, por lo que poco más se puede añadir.

Ahora se analizará el canal SUI-2 cuando el porcentaje de interferencia es del 100%.

2.3.3.4 Simulación canal SUI-2 con porcentaje de interferencia co-canal al 100%

Para finalizar el análisis al canal SUI-2, se presentarán los resultados obtenidos cuando el porcentaje de interferencia es del 100%. Visto que todos los resultados para el canal SUI-2 han sido similares a los obtenidos con el canal SUI-1, cabe esperar que en este apartado ocurra lo mismo y la comunicación sea imposible. Aún así, se muestra la gráfica obtenida:



Gráfica 12: Simulación canal SUI-2 con porcentaje interferencia co-canal 100%

Como se observa, efectivamente, la comunicación se hace imposible, puesto que se obtienen unos valores de BER igual a 1 para cualquier SNR que se utilice. Como se hizo en anteriores simulaciones, hasta llegar al porcentaje del 100% se ha ido subiendo progresivamente la interferencia co-canal desde el porcentaje del 50% y los resultados obtenidos han vuelto a ser similares a los obtenidos con el canal SUI-1. Se ha

comprobado que el sistema para el canal SUI-2 soporta un porcentaje de interferencia igual al que soportaba el canal SUI-1, es decir, un porcentaje de hasta un 71-72%.

Una vez finalizado el análisis del canal SUI-2, se concluye que dado que pertenece al mismo modelo de canal SUI que el canal SUI-1, es decir, al tipo C, ambos canales obtienen resultados parecidos, eso sí, habiendo sido necesario ajustar ligeramente el ancho de banda del canal SUI-2 respecto al canal SUI-1 debido a que una de las diferencias al modelar un canal y otro es que cambia la frecuencia Doppler. En cuanto al prefijo cíclico, se ha visto que no ha sido necesario modificarlo de un análisis a otro, puesto que el retraso que introduce el canal no era lo suficientemente diferente entre un canal y otro como para necesitar un mayor número de muestras de prefijo cíclico.

A continuación, se analizará el siguiente tipo de escenario que define el modelo SUI, el tipo B. En este caso, debido a que se trata de un tipo diferente de escenario, cabe esperar que habrá que modificar tanto el ancho de banda como el prefijo cíclico para así conseguir la mejor simulación posible. La explicación detallada de si ha sido necesario modificarlos y el porqué se explicará en el siguiente apartado.

2.3.4 Simulaciones con/sin codificar canal SUI-3

Después de haber analizado los dos canales que se incluyen dentro del modelo SUI tipo C, ahora se va a analizar los dos canales que se incluyen en el modelo SUI tipo B. Este apartado se centrará en el análisis del canal SUI-3, y en el siguiente, se analizará el otro canal existente en el tipo B, el canal SUI-4.

El escenario que define el modelo SUI tipo B, como se mencionó en la sección 2.2.2.3, corresponde a un escenario en el que la orografía de nuevo es plana, pero ahora la vegetación no será baja o de escasa densidad, sino que se trata de una vegetación de densidad media, lo que provocará que la comunicación se puede degradar algo más respecto a un escenario tipo C, ya que un aumento de la vegetación se traduce en un aumento de los obstáculos. Este escenario también puede definir un terreno montañoso con vegetación escasa, por lo que dependiendo del canal puede provocar más o menos pérdidas.

Al igual que en las anteriores simulaciones, lo que hay que hacer a continuación es ajustar tanto el ancho de banda como el prefijo cíclico que se usará. Dado que el escenario ha cambiado y, por tanto, el retraso que introduce el canal también, es de esperar que haya que modificar ambos parámetros.

Después de realizar varias simulaciones con distintos parámetros, se llegó a la conclusión de que era necesario reducir el ancho de banda y aumentar el número de muestras del prefijo cíclico, para así conseguir reducir el impacto que introduce este nuevo canal en cuanto al retraso y, con ello, evitar los efectos de la interferencia ISI que pueden hacer que, sumada a la interferencia co-canal que se va a introducir, los resultados obtenidos sean peores y no se esté analizando exclusivamente el efecto de la interferencia co-canal en el sistema que es el objetivo de este trabajo.

Por tanto, los parámetros usados para la simulación del canal SUI-3 son:

- Canal SUI-3
- Modulación QPSK
- Prefijo cíclico de 32 muestras ($G=1/8$)
- Ancho de banda nominal de 9 MHz
- Envío de 100 símbolos OFDM

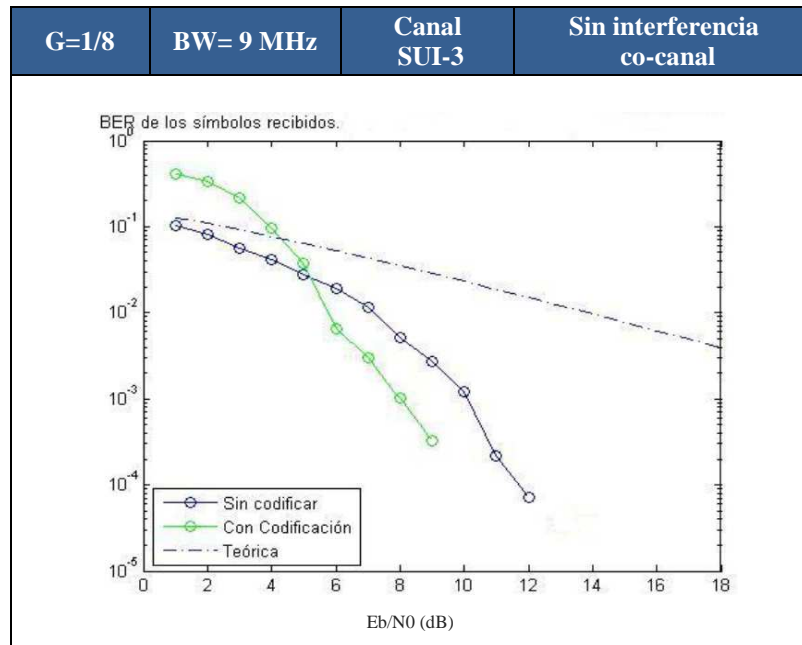
Como en anteriores apartados, las simulaciones se centrarán en estudiar el comportamiento del canal SUI-3 cuando no existe interferencia co-canal para, posteriormente, ir añadiéndola para ver cómo le va afectando al canal y hasta cuánto soporta.

Dicho esto, se empieza con el análisis del sistema WIMAX cuando no existe interferencia co-canal utilizando un canal tipo SUI-3. Se recuerda que en la sección 2.2.2.2 se pueden ver las características del canal SUI-3 y los parámetros que lo definen.

2.3.4.1 Simulación canal SUI-3 sin interferencia co-canal

Se comienza con el análisis del comportamiento del canal SUI-3, por lo que no se introduce ningún tipo de interferencia, puesto que lo que se quiere ver es cómo reacciona el canal SUI-3 y el efecto que provoca este canal en la comunicación. Conociendo ese comportamiento, se podrá ver en posteriores simulaciones en las que sí se introducirá interferencia, el efecto que produce dicha interferencia.

La gráfica obtenida (Gráfica 13) con los parámetros ya comentados se presenta a continuación:



Gráfica 13: Simulación canal SUI-3 sin interferencia co-canal

Para la simulación obtenida en esta ocasión, se observa en primer lugar que los niveles de calidad obtenidos son buenos, puesto que los niveles de BER se sitúan prácticamente en 10^{-4} , además de que la simulación obtenida se encuentra bastante por debajo de la simulación teórica, lo cual supone un buen resultado.

Al haber cambiado el canal de las anteriores simulaciones por el canal SUI-3, que pertenece al modelo tipo B, el cual presenta mayor nivel de vegetación, se aprecia que el ratio BER-SNR es algo peor, en este caso, que en los canales que pertenecían al modelo tipo C. Esto se puede comprobar mirando los niveles de SNR que se han conseguido. Haciendo foco en la señal codificada, para lograr un nivel de BER de alrededor de 10^{-4} es necesario una SNR de 9 dB, mientras que, para uno de los canales del tipo C era necesario una SNR de 8db. A simple vista no parece una gran diferencia, pero hay que recordar que se está en un escenario de pérdidas nivel medio que puede seguir simulando un escenario con orografía plana, lo cual, explica que no se obtenga una diferencia mayor respecto a un canal tipo SUI-2 por ejemplo.

En cuanto a la señal sin codificar, se observa que para obtener los mismos niveles de BER que la codificada necesita 12 dB de SNR, lo cual supone un incremento de 3dB respecto a la señal codificada. Haciendo foco en los resultados que se obtuvieron para el canal SUI-2, se aprecia que la gráfica de la señal sin codificar es prácticamente igual.

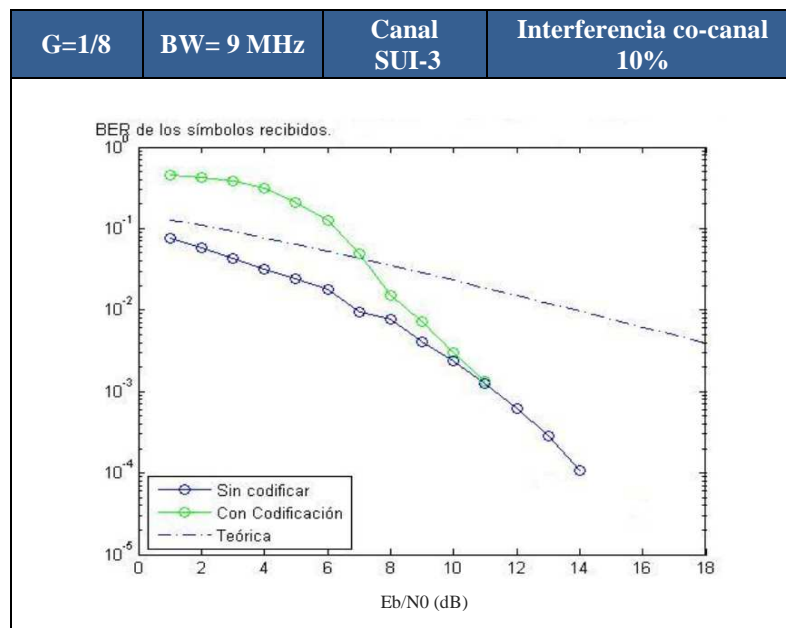
Esto es debido a que, aunque se haya cambiado el canal, siempre se busca la mejor simulación posible ajustando los parámetros de la simulación, por lo que se compensa los efectos del canal con dicho ajuste, puesto que el fin de este trabajo es ver cómo afecta a cada canal la introducción de interferencia co-canal, no el hacer una comparación entre canales, aunque en la medida de lo posible se vaya haciendo para conseguir un trabajo más exhaustivo.

Una vez analizado el canal SUI-3, donde se aprecia un cierto deterioro del ratio BER-SNR respecto a los modelos tipo C, a continuación se introducirá interferencia co-canal a la comunicación para ver cómo se comporta con este canal y hasta donde soporta.

2.3.3.5 Simulación canal SUI-3 con porcentaje de interferencia co-canal 10%

Ahora que se conoce cómo reacciona la transmisión WIMAX cuando el canal utilizado para la comunicación es del tipo SUI-3, se procederá a introducir interferencia co-canal. Como en las anteriores ocasiones, se empezará con un porcentaje de interferencia co-canal al 10%.

La gráfica obtenida (Gráfica 14) se presenta a continuación:



Gráfica 14: Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 10%

La primera observación que se puede hacer y que a su vez es chocante, es que para esta simulación, a la señal codificada le ha costado ajustarse, puesto que da peores resultados en términos de calidad que la señal sin codificar, ya que presenta una BER de alrededor de 10^{-3} frente a 10^{-4} que presenta la señal sin codificar. Esto no quiere decir que la comunicación no sea posible, puesto que el nivel de BER sigue siendo aceptable para ambos casos.

Sin embargo, aunque es verdad que la señal sin codificar obtiene un nivel de BER de 10^{-4} , para que obtenga ese valor es necesario un valor de SNR de 14 dB, lo cual empieza a ser un valor alto de relación señal a ruido. Sin embargo, la señal codificada, aunque con menor valor de BER, aún sigue siendo una comunicación aceptable y le hacen falta 3 dB menos que a la señal sin codificar, puesto que el nivel de SNR es de 11 dB.

Dicho esto, la conclusión respecto a este tema, es que para la señal codificada, a pesar de que el nivel de BER es peor, no pone en peligro la calidad de la comunicación y el ratio BER-SNR es mejor, puesto que es necesaria menos relación señal a ruido. Dicho esto, se concluye que sigue siendo recomendable usar las etapas de codificación del estándar, aunque sí es cierto que ésta es la primera simulación de las que se han realizado que no ha sido tan clara esta conclusión.

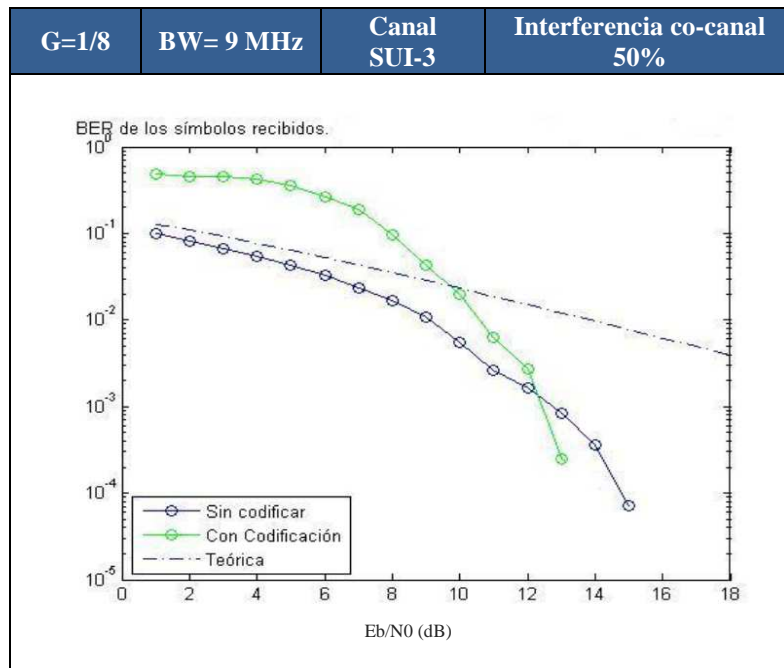
Comparando estos resultados con la simulación anterior en la que no existía interferencia co-canal (Gráfica 13), se observa que, aunque el porcentaje de interferencia es pequeño, la comunicación se ha visto afectada, puesto que ahora es necesario en ambos casos 3 dB más de SNR para conseguir unos niveles aceptables de calidad, lo cual es un aumento considerable.

A falta de seguir con el análisis, se puede ir viendo que la interferencia co-canal afecta más a este tipo de canal de lo que afectaba a los canales del tipo C, puesto que con un porcentaje de interferencia bajo, se ha visto mayor degradación de la comunicación de la que se vio para el mismo caso en los canales tipo C.

2.3.3.6 Simulación canal SUI-3 con porcentaje de interferencia co-canal al 50%

Para la siguiente simulación se ha incrementado el porcentaje de interferencia co-canal y se ha comprobado que la comunicación se seguía degradando, como ocurría cuando el porcentaje de interferencia co-canal era pequeño. La simulación que se analizará corresponde a un porcentaje de interferencia co-canal que ha llegado al 50%.

La gráfica obtenida (Gráfica 15) es:



Gráfica 15: Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 50%

Al igual que pasaba con la gráfica del subapartado anterior, a la señal codificada le cuesta ajustarse, aunque finalmente lo consigue y alcanza unos niveles de BER por debajo de la simulación teórica y con valor entre 10^{-3} y 10^{-4} .

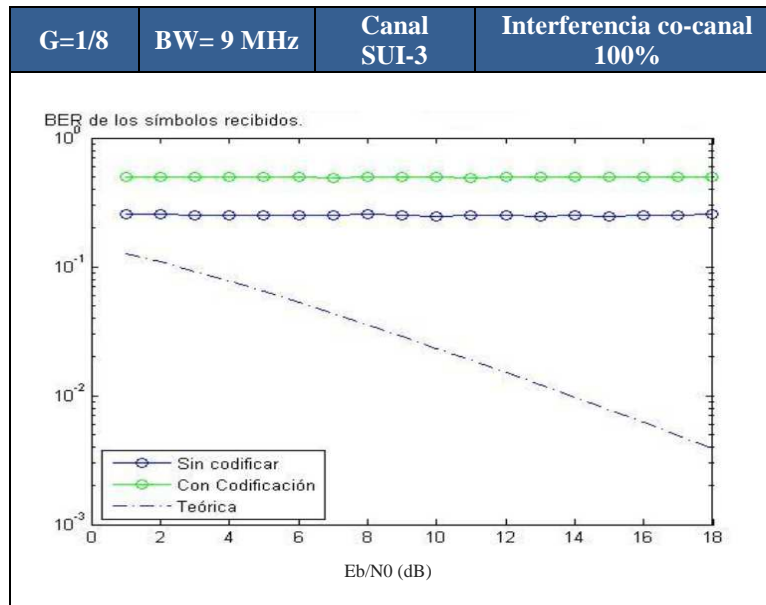
Esto está ocurriendo porque el canal, aunque mantiene los niveles de calidad, soporta peor la degradación que los canales del tipo C y, lo que se está observando, es que la señal necesita unos niveles de SNR cada vez más grandes, además de que se está acercando a la simulación teórica, por tanto son resultados peores que los ratios que se conseguían con los canales de tipo C.

Haciendo foco en la señal sin codificar, se observa que los niveles de SNR son muy altos para conseguir unos niveles aceptables de calidad, lo cual indica que, en cuanto se incremente un pequeño porcentaje más la interferencia co-canal, la comunicación no será posible, por lo que es previsible que este canal SUI-3 soporte menos porcentaje de interferencia que los anteriores analizados, pero esto será comprobado en el siguiente apartado.

2.3.3.7 Simulación canal SUI-3 con porcentaje de interferencia co-canal al 100%

Para finalizar el análisis del canal SUI-3 se incrementa de nuevo la interferencia co-canal, aunque visto el apartado anterior, se puede intuir el resultado que se obtendrá.

La siguiente gráfica (Gráfica 16) muestra los resultados cuando el porcentaje de interferencia co-canal es el más alto posible, del 100%:



Gráfica 16: Simulación canal SUI-3 con porcentaje interferencia co-canal 100%

Observando la imagen y habiendo leído las anteriores simulaciones, se concluye que este tipo de canal tampoco soporta un porcentaje de interferencia co-canal del 100%, puesto que lo que se recibe al introducir tanta interferencia es todo erróneo, ni con los sistemas de codificación se puede recuperar en el receptor la información enviada por el usuario, por ese motivo, da igual lo alto que se ponga el nivel de la relación señal a ruido.

Con el fin de saber hasta dónde soportaba el sistema, se hicieron pruebas con porcentajes entre el 50% y el 100% de interferencia, obteniendo como resultado que este canal soporta un porcentaje de interferencia co-canal de alrededor del 67%, lo cual es un buen resultado, pero peor que el obtenido en los canales tipo C. Esto tiene sentido, puesto que el canal SUI-3 pertenece al grupo tipo B, el cual representa un escenario con pérdidas nivel medio, mientras que el tipo C, representaba pérdida nivel bajo y esa diferencia, como se ha analizado, se ha hecho notar a pesar de haber ajustado los parámetros al canal estudiado.

2.3.5 Simulaciones con/sin codificar canal SUI-4

Como se mencionó en el subapartado anterior, el otro canal que junto con el canal SUI-3 pertenece al modelo SUI tipo B, es el canal SUI-4. La principal diferencia entre un canal y otro, aunque modelen el mismo escenario, son los parámetros que definen el factor K y la frecuencia Doppler, por tanto, el retraso del canal se modifica.

Haciendo foco en la Tabla 15 donde se exponen los parámetros que modelan en canal SUI-4, se observa que la frecuencia Doppler tendrá un mayor efecto en este canal que en el canal SUI-3 ya estudiado. Por este motivo, será necesario ajustar el ancho de banda que se usará para la simulación, mientras que el prefijo cíclico se podrá dejar con el mismo valor que se usó para el canal SUI-3, puesto que, aunque el retraso que modelan uno y otro no es el mismo, sí es similar al modelar ambos el mismo tipo de escenario. Sabiendo esto, se ha decidido que con un prefijo cíclico de 32 muestras seguirá siendo suficiente para evitar la interferencia de tipo ISI que puede hacer empeorar los resultados.

Después de hacer diversas pruebas, se ha visto que el ancho de banda para este caso tiene que disminuirse ligeramente y ajustarse a 8 MHz, quedando los parámetros de la simulación para el canal SUI-4:

- Canal SUI-4
- Modulación QPSK
- Prefijo cíclico de 32 muestras ($G=1/8$)
- Ancho de banda nominal de 8 MHz
- Envío de 100 símbolos OFDM

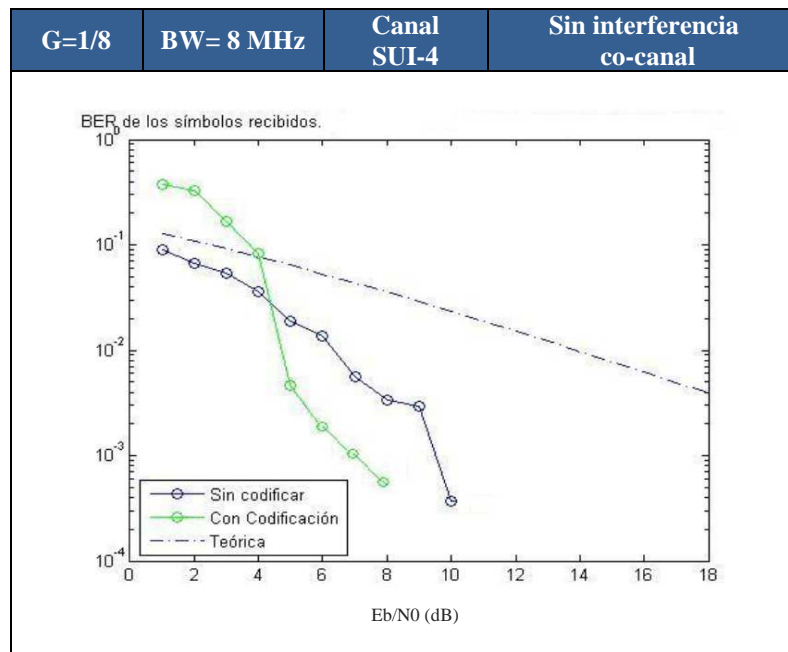
Ahora que se han explicado los parámetros que se usarán en la simulación y por qué ha sido necesario modificarlos, se comenzará con el análisis del canal SUI-4. Debido a que este canal y el canal SUI-3 pertenecen al mismo tipo de escenario, cabe esperar que los resultados sean parecidos, aunque no iguales, puesto que el retraso del canal y sus características no son exactamente las mismas.

Se comienza con el análisis del canal sin introducir interferencia para posteriormente ir subiendo esta interferencia co-canal y ver cómo reacciona el sistema, como se hizo en los anteriores análisis realizados.

2.3.5.1 Simulación canal SUI-4 sin interferencia co-canal

Como se ha mencionado en la sección principal de este canal, después de hacer diversas simulaciones con distintos anchos de banda y prefijos cíclicos, se ha observado que tan solo es necesario modificar el ancho de banda de la simulación y mantener en el mismo valor que para el canal SUI-3 el prefijo cíclico. Esto se debe a que una de las principales diferencias entre el canal SUI-4 y el canal SUI-3, es el efecto que produce la frecuencia Doppler, y en el caso del canal SUI-4 es mayor que en el SUI-3. Sin embargo, el retraso existente entre SUI-3 y SUI-4 no es suficientemente diferente como para tener que ampliar el número de muestras del prefijo cíclico, puesto que después de hacer la simulación con 64 muestras, se demostró que la mejora no era considerable, por lo que se decidió dejarlo en 32 muestras.

Dicho esto, se presenta la simulación para el canal SUI-4 cuando no existe interferencia co-canal (Gráfica 17):



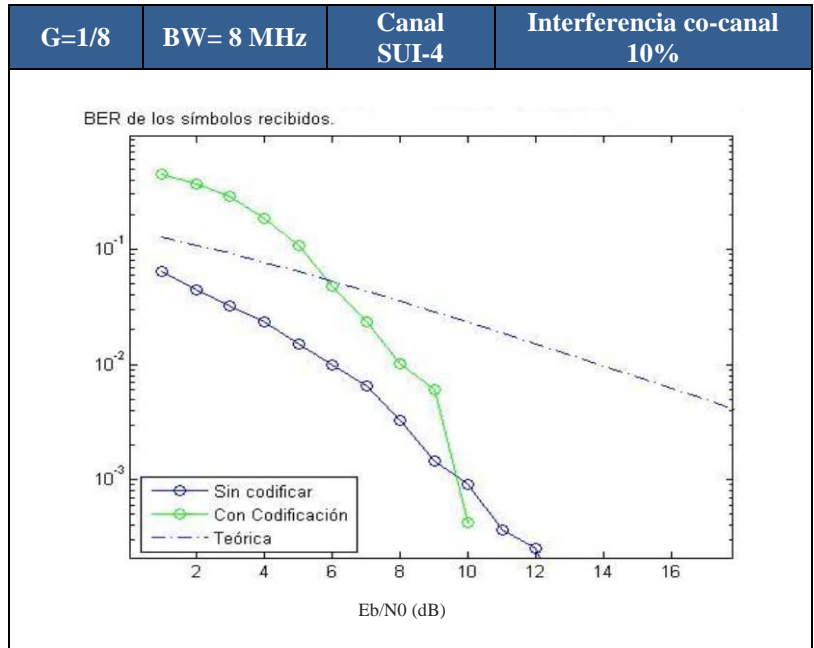
Gráfica 17: Simulación canal SUI-4 sin interferencia co-canal

Una vez más se obtienen gráficas similares a los anteriores casos en las que el ratio BER-SNR es muy bueno, puesto que está bastante por debajo de la simulación teórica y la señal codificada converge antes y a valores mejores que la señal sin codificar.

Centrando la atención en los niveles de relación señal a ruido, comparándolos con los del canal SUI-3, se observa que los del canal SUI-4 son mejores, puesto que consiguen niveles de calidad similares, siempre mejores que 10^{-3} , con un nivel 1 dB por debajo de los obtenidos para el canal SUI-3. Esto se explica en que los parámetros del sistema WIMAX se ajustan mejor al canal SUI-4 que al SUI-3, es decir, se consigue que funcione algo mejor con el modelo SUI-4 que con el modelo SUI-3.

2.3.5.2 Simulación canal SUI-4 con porcentaje de interferencia co-canal al 10%

Ahora que está ajustado el sistema al canal SUI-4 y, que gracias a la anterior simulación se conocen qué efectos y cómo afecta el canal SUI-4 en la comunicación cuando se usa este canal, se irá introduciendo interferencia co-canal para comprobar la reacción del sistema a dicha interferencia:



Gráfica 18: Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 10%

Lo que se aprecia en un primer vistazo, es que el ratio BER-SNR se ha deteriorado bastante considerando que tan solo se ha introducido un porcentaje de interferencia del 10%. Esto se ve en que los niveles de BER se han reducido, estando aún en niveles aceptables, eso sí, para dichos niveles, la relación señal a ruido se ha deteriorado en 2 dB tanto en la señal codificada como en la sin codificar.

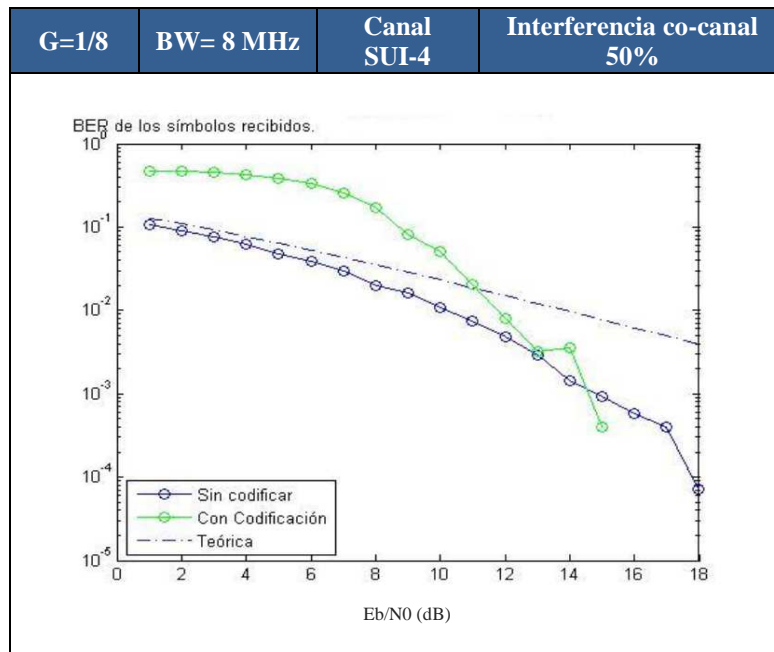
Comparando esta gráfica (Gráfica 18) con la gráfica obtenida para el caso en el que el canal es de tipo SUI-3 con porcentaje de interferencia co-canal del 10% (Gráfica 14), se observa que esta simulación, al igual que pasaba con el caso de un escenario sin interferencia, el canal SUI-4 obtiene mejores resultados que el canal SUI-3. Esto se puede ver en que para obtener niveles similares de calidad, para el canal SUI-4, la señal codificada presenta 10 dB, mientras que para el canal SUI-3 presenta 11 dB. En el caso de la señal sin codificar esta diferencia es aún algo mayor, concretamente de 2 dB, ya que en el canal SUI-4 se necesitan 12 dB y para el canal SUI-3 se requieren 14 dB.

Dicho esto, se concluye que sigue ocurriendo como en la simulación sin interferencia, el canal SUI-4 obtiene unos resultados ligeramente mejores que el canal SUI-3. Con las siguientes simulaciones se va a comprobar si se sigue cumpliendo este efecto.

2.3.5.3 Simulación canal SUI-4 con porcentaje de interferencia co-canal al 50%

Siguiendo con la estructura de análisis planteada en este trabajo, a continuación se aumentará el porcentaje de interferencia co-canal de la transmisión hasta el 50%. Dados los resultados obtenidos cuando el porcentaje de interferencia era pequeño, cabe esperar que para un porcentaje del 50% se sitúe cerca del nivel máximo que soporta la comunicación con este canal.

Para comprobar esta primera hipótesis, se muestra la gráfica obtenida para un canal SUI-4 con porcentaje de interferencia co-canal del 50% (Gráfica 19):



Gráfica 19: Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 50%

Antes de realizar cualquier análisis, se puede apreciar a simple vista que la simulación obtenida presenta un nivel de degradación alto.

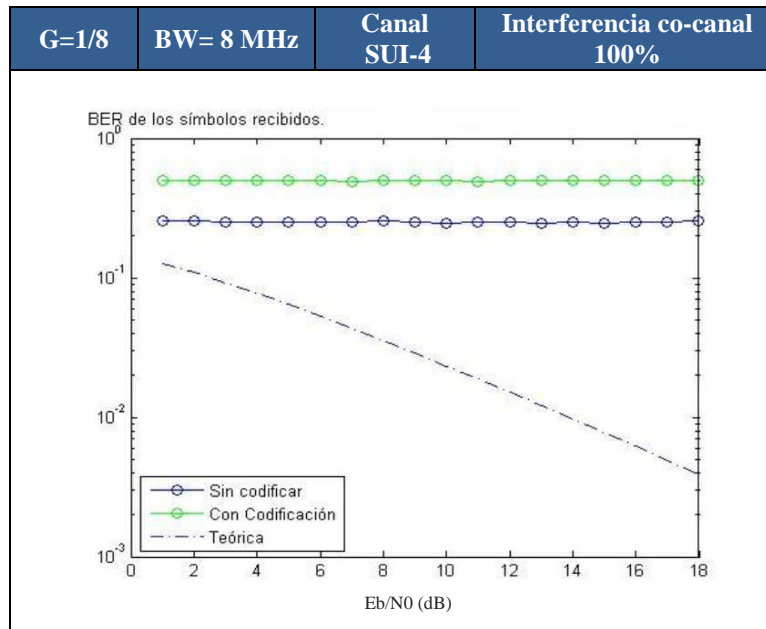
Haciendo foco en el ratio BER-SNR, se observa que ha empeorado considerablemente, puesto que, aunque los niveles de calidad de la comunicación se siguen manteniendo, esto es a costa de un nivel de SNR muy alto. Centrando ahora la atención en la señal codificada, para mantener el nivel de BER en torno a 10^{-3} se requiere una SNR de 15 dB y analizando la señal sin codificar, se necesitan 18 dB. Estos niveles son los más altos obtenidos hasta ahora si se compara con las simulaciones realizadas.

Además, si se compara la señal codificada y la señal sin codificar con la simulación teórica, se observa que están muy próximas a ésta, lo que lleva a pensar que el sistema va a soportar un porcentaje poco más alto del 50% antes de que la degradación sea tan elevada que no permita la comunicación.

Para comprobar esta hipótesis, se va a realizar simulaciones hasta alcanzar un porcentaje del 100% de interferencia co-canal como se hizo en los anteriores análisis.

2.3.5.4 Simulación canal SUI-4 con porcentaje de interferencia co-canal al 100%

Al igual que se hizo en los anteriores análisis, se ha ido incrementando el porcentaje de interferencia co-canal hasta llegar al 100%. Como se puede ver en la gráfica que se muestra a continuación (Gráfica 20), como pasaba para los canales analizados, la comunicación se hace insostenible para cualquier relación señal a ruido, puesto que el nivel de BER es próximo a valor 1.



Gráfica 20: Simulación canal SUI-4 con porcentaje interferencia co-canal 100%

De los resultados obtenidos hasta ahora, este era el más esperable viendo cómo había reaccionado la comunicación cuando el porcentaje de interferencia era aún del 50%.

Al igual que ocurrió con los anteriores canales, para llegar a un porcentaje de interferencia del 100%, se ha ido incrementando el porcentaje de interferencia co-canal gradualmente desde el porcentaje del 50% y los datos obtenidos son peores que los se obtuvieron para el canal SUI-3, el cual, cabe recordar que pertenece al mismo tipo de escenario que el canal SUI-4. En esta ocasión, se ha comprobado que el porcentaje máximo de interferencia co-canal que soporta el sistema está en torno al 60%, lo que corrobora lo que se venía anunciando desde casi el principio del análisis: este canal hace que el sistema se comporte peor ante la interferencia co-canal que el canal SUI-3 y, por supuesto, peor que los canales del tipo C. Esto es debido a que el canal SUI-4 pertenece a un grupo con nivel de pérdidas medio y dentro del grupo tipo B, presenta más pérdidas que el canal SUI-3.

2.3.6 Simulaciones con/sin codificar canal SUI-5

Una vez se han analizado los canales tipo B y C, se va entrando en la recta final del trabajo realizado quedando por analizar los canales SUI-5 y SUI-6, pertenecientes al grupo tipo A del modelo SUI.

Tal como se mencionó en la sección 2.2.2.1, un canal tipo A simula un escenario con terreno montañoso con una densidad de vegetación medio-alta que corresponde a unas condiciones de pérdidas elevadas.

Al igual que se hizo antes de empezar cualquier análisis o simulación, lo primero que es necesario hacer es ajustar los parámetros de la simulación. Para ello, en primer lugar se dejaron los parámetros usados en la anterior simulación del canal SUI-4 y se vio que los resultados obtenidos no eran lo suficientemente buenos, por lo que se decidió probar ajustando primero el prefijo cíclico para así eliminar la interferencia ISI que pudiera existir.

El sistema, como ya se explicó, está diseñado para 4 posibles valores de prefijo cíclico (8 muestras, 16 muestras, 32 muestras, 64 muestras), por lo que dentro de estas posibilidades, se ha decidido usar un prefijo cíclico de 64 muestras. Esta elección se apoya en que los canales tipo A presentan mayor retraso que los canales tipo B, por lo que este canal SUI-5 presentará más retraso que el canal SUI-4. Esto quiere decir que será necesario introducir más muestras de prefijo cíclico que las que se estaban usando para el canal SUI-4, por lo que la única opción es usar 64 muestras de prefijo cíclico, puesto que los canales tipo B estaban usando 32 muestras.

En cuanto al ancho de banda elegido, se ha seguido la tendencia de que disminuyendo el ancho de banda usado, las simulaciones presentaban mejores resultados. Después de probar con varios anchos de banda, se ha decidido que el canal SUI-5, sin introducir interferencia co-canal, presentaba sus mejores resultados cuando el ancho de banda se fijaba en 6 MHz, por lo que se ha decidido fijar el parámetro a este valor.

Por tanto, a modo de resumen, los parámetros usados para la simulación del canal SUI-5 son:

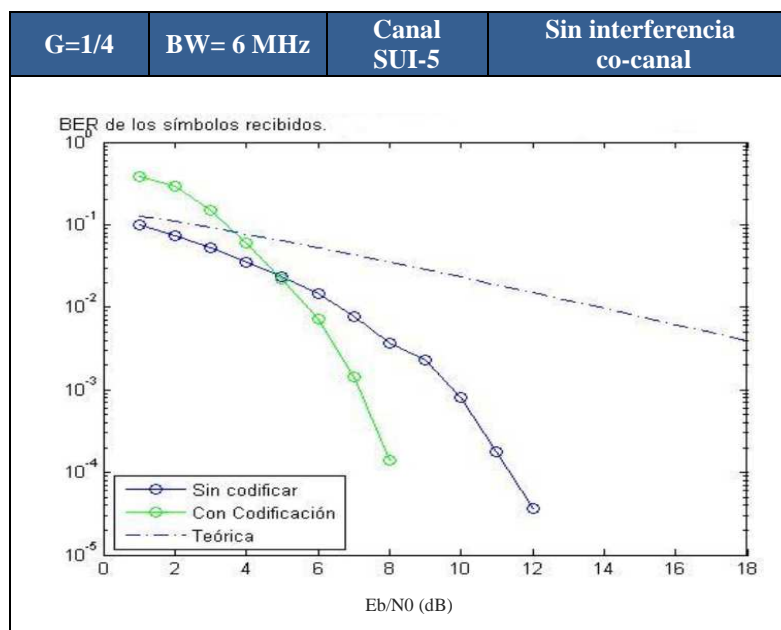
- Canal SUI-5
- Modulación QPSK
- Prefijo cíclico de 64 muestras ($G=1/4$)
- Ancho de banda nominal de 6 MHz
- Envío de 100 símbolos OFDM

Dicho esto, comienza este análisis del sistema WIMAX para ver cómo se comporta con el canal SUI-5 según se va añadiendo interferencia co-canal en la comunicación.

2.3.6.1 Simulación canal SUI-5 sin interferencia co-canal

Al igual que sucedió con los análisis expuestos en anteriores secciones, en primer lugar se verá cómo funciona la comunicación simulada cuando el canal que se está usando es el canal SUI-5. Por ello, en esta simulación no será introducida interferencia co-canal y así se observará el comportamiento de la comunicación debido exclusivamente al canal elegido.

La gráfica obtenida (Gráfica 21) con los parámetros comentados anteriormente se presenta a continuación:



Gráfica 21: Simulación canal SUI-5 sin interferencia co-canal

Uno de los primeros resultados que pueden llamar la atención es el buen ratio SNR-BER obtenido en este caso, puesto que se han obtenido valores de BER entre 10^{-4} y 10^{-5} para un valor de SNR de 8 dB, en el caso de la señal codificada, y de 12 dB para la señal sin codificar.

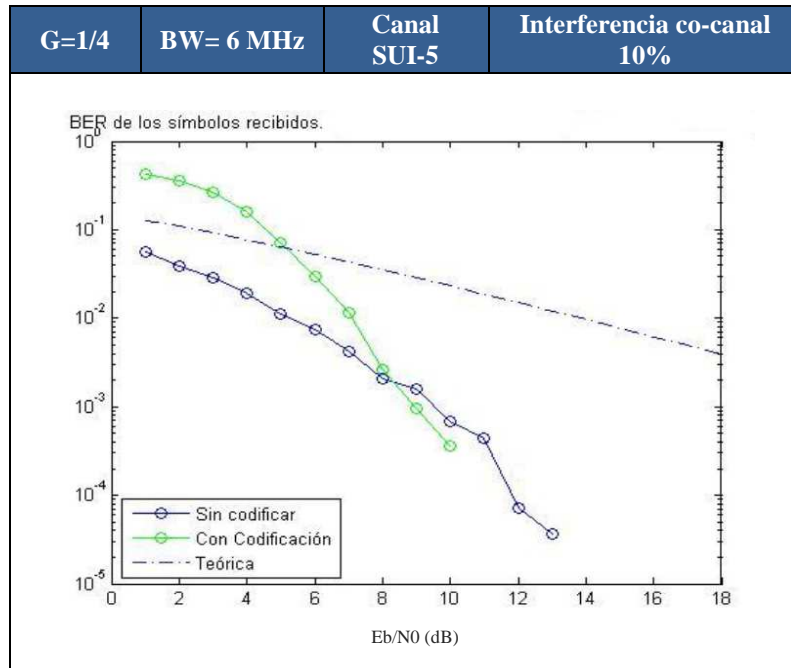
Añadido a esto, se observa que ambas señales se encuentran lejos de la simulación teórica, lo que indica que los resultados obtenidos son óptimos y que los parámetros elegidos son adecuados, puesto que se está analizando un canal que contiene efecto Doppler elevado, además de que corresponde a un escenario con pérdidas nivel medio.

Cabe esperar dado los niveles de BER conseguidos, que son realmente buenos, que el sistema soporte bastante bien la interferencia co-canal, ya que al llegar a obtener niveles de BER hasta de 10^{-5} , el sistema tiene un margen relativamente amplio hasta deteriorarse por completo.

2.3.6.2 Simulación canal SUI-5 con porcentaje de interferencia co-canal al 10%

Puesto que se conoce cómo reacciona la comunicación cuando el canal usado se trata de un canal SUI-5, ahora se introducirá un pequeño porcentaje de interferencia co-canal, concretamente del 10% para analizar los efectos que produce la interferencia co-canal en la transmisión con este canal.

La gráfica obtenida (Gráfica 22) para este caso se muestra a continuación:



Gráfica 22: Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 10%

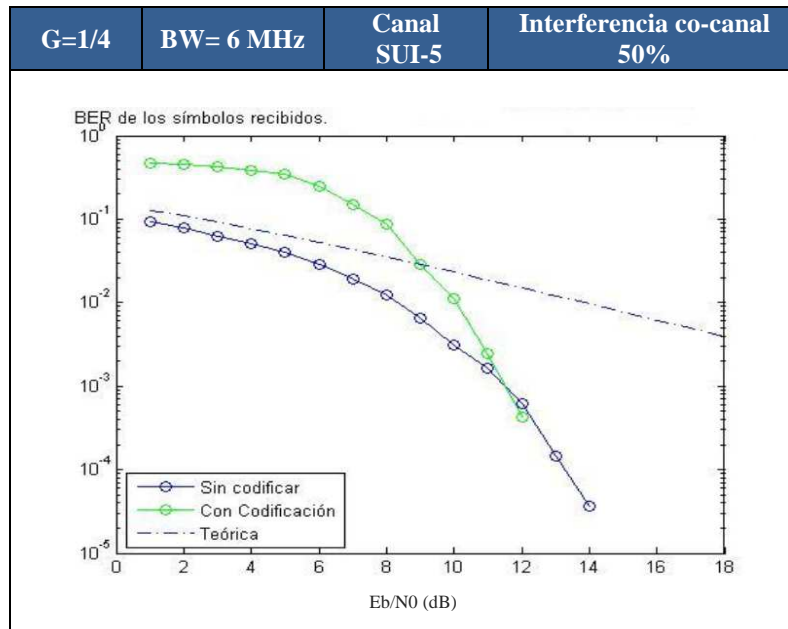
En la gráfica (Gráfica 22), se puede comprobar que los niveles de BER siguen siendo buenos puesto que están alrededor de 10^{-4} , mejorando incluso este dato en el caso de la señal sin codificar. Sin embargo, la introducción de la interferencia co-canal ha tenido un cierto efecto de degradación en la comunicación, puesto que los niveles de SNR han subido y, por tanto, el ratio BER-SNR ha empeorado ligeramente. Este hecho se puede ver, por ejemplo, haciendo foco en la señal codificada, que para conseguir la misma calidad de servicio, en esta ocasión, requiere tener una SNR de 10 dB, mientras que antes bastaba con 8 dB.

Si ahora se compara este resultado con el obtenido para el canal SUI-4 con el mismo porcentaje de interferencia (Gráfica 18), se observa que los resultados son similares desde el punto de vista del ratio BER-SNR. Esto puede ser debido a que, aunque ambos definen distintos escenarios, el canal SUI-4 dentro del tipo de canal B representa el escenario con pérdidas medias al igual que ocurre con el canal SUI-5 dentro del tipo de canal A, por lo que aunque existen diferencias, representan un escenario con características parecidas. Cabe esperar que estos resultados empeoren cuando se analice el canal SUI-6, puesto que ese tipo de canal representa al mismo escenario que el canal SUI-5 pero con pérdidas altas en vez de medias.

2.3.6.3 Simulación canal SUI-5 con porcentaje de interferencia co-canal al 50%

Una vez analizado el sistema cuando el porcentaje de interferencia es pequeña, para esta sección se ha ido incrementando el porcentaje de interferencia co-canal respecto a lo introducido en el anterior apartado hasta llegar a un porcentaje del 50%.

La gráfica obtenida (Gráfica 23) se muestra a continuación:



Gráfica 23: Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 50%

Lo primero que se observa en la gráfica es que, para estar en una simulación con un porcentaje de interferencia co-canal del 50%, los niveles de calidad se encuentran en niveles más que aceptables, puesto que se siguen obteniendo valores de BER mejores de 10^{-3} .

En cuanto a la relación señal a ruido, para la señal codificada se observa que son necesarios 12 dB para mantener los niveles de BER en cotas que permitan una comunicación con buena calidad, mientras que para la señal sin codificar, este valor de SNR se va a los 14 dB.

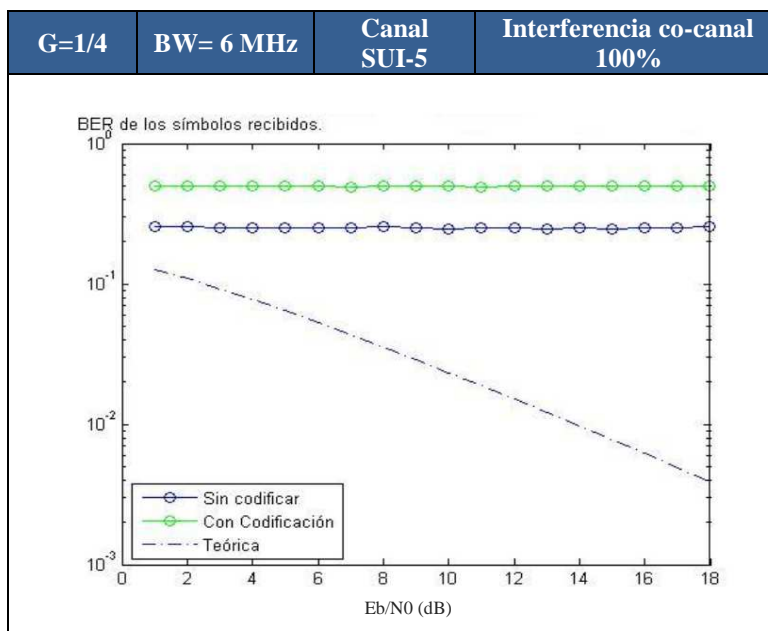
Estos datos, aunque son buenos para un porcentaje de interferencia relativamente alto, el ratio BER-SNR ha empeorado respecto a la gráfica obtenida en el apartado anterior (Gráfica 22) donde se representaba una simulación con interferencia co-canal al 10%.

Como conclusión a este apartado, se puede afirmar que, efectivamente, como cabría esperar dado el porcentaje de interferencia co-canal que se ha introducido, la comunicación se ha visto deteriorada desde el punto de vista de la SNR, puesto que ahora hacen falta más decibelios para conseguir los mismos valores de calidad. Sin embargo, se puede aventurar que este canal soportará mayor porcentaje de interferencia co-canal que, por ejemplo, el canal SUI-4, puesto que los niveles de BER obtenidos siguen estando en niveles más que aceptables. Esta suposición se comprobará en el siguiente apartado donde el porcentaje de interferencia co-canal se irá subiendo hasta alcanzar el 100%.

2.3.6.4 Simulación canal SUI-5 con porcentaje de interferencia co-canal al 100%

Para finalizar el análisis del canal SUI-5, se ha hecho como en los anteriores canales, aumentar progresivamente el porcentaje de interferencia co-canal desde el porcentaje del 50% hasta el 100% para ver hasta cuánto soporta la comunicación.

La gráfica obtenida (Gráfica 24) al porcentaje del 100% se muestra a continuación:



Gráfica 24: Simulación canal SUI-5 con porcentaje interferencia co-canal 100%

Al igual que pasaba con las anteriores simulaciones, este canal tampoco soporta un porcentaje tan alto de interferencia co-canal, puesto que la simulación obtenida es la peor que se podría obtener dado que presenta un nivel de BER de valor 1 para cualquier SNR.

Una vez obtenido este resultado, se han ido probando distintos porcentajes de interferencia co-canal entre el porcentaje del 50% y el del 100% para ver el límite de interferencia que permite esta comunicación. Este límite se ha fijado en un porcentaje de interferencia co-canal de alrededor del 70% que es cuando, tanto la señal codificada como sin codificar, empiezan a dar peores resultados que la simulación teórica.

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que este canal se comporta bastante bien respecto a la interferencia co-canal, puesto que soporta un porcentaje alto si se compara con otros canales como el SUI-4. Este mejor comportamiento respecto al canal mencionado, puede ser debido por dos motivos. En primer lugar, porque el SUI-4 presenta un alto efecto Doppler, mientras que el canal SUI-5 presenta un efecto bajo. Además, el canal SUI-4 modela un escenario con colinas altas y escasa vegetación, mientras que el canal SUI-5 modela un escenario con colinas bajas y vegetación media-abundante. Esto lleva a pensar, como es lógico, que la vegetación afecta mucho menos a la comunicación que la altura del terreno, por lo que, si añadido a estos obstáculos se suma la interferencia co-canal, es normal que el canal SUI-5 se comporte mejor que el canal SUI-4.

2.3.7 Simulaciones con/sin codificar canal SUI-6

Llegados a este punto del trabajo, solo queda por analizar el último canal que define el modelo SUI, el canal SUI-6. Este canal, al igual que el canal anterior, el SUI-5, pertenece al grupo tipo A, por lo que el escenario modelado por ambos es el mismo salvo por pequeñas diferencias. Como ocurría con los canales del grupo A y B, la principal diferencia entre el canal SUI-5 y SUI-6 son los parámetros que definen el factor K y la frecuencia Doppler.

Fijándose en las Tabla 12 y Tabla 13, se aprecia que el canal SUI-6 tendrá un efecto Doppler mayor que el canal SUI-5 o SUI-4, por lo que será necesario ajustar de nuevo los parámetros de la simulación para obtener una simulación lo más óptima posible cuando no existe interferencia co-canal.

Después de hacer diversas pruebas, se ha visto que el ancho de banda para este caso tiene que disminuirse ligeramente y ajustarse a 4 MHz, quedando los parámetros de la simulación para el canal SUI-6:

- Canal SUI-6
- Modulación QPSK
- Prefijo cíclico de 64 muestras ($G=1/4$)
- Ancho de banda nominal de 4 MHz
- Envío de 100 símbolos OFDM

Antes de realizar el análisis, por la similitud que presenta el canal SUI-5 y SUI-6 con el canal SUI-3 y SUI-4, no olvidando el hecho de que cada uno pertenece a un modelo de canal SUI, como primera hipótesis cabe esperar que los resultados obtenidos en el canal SUI-5 sean mejores que los que se obtendrán en el canal SUI-6. Esto es debido a que el canal SUI-4 y SUI-6 presentan un efecto Doppler alto, mientras que el canal SUI-3 y SUI-5 presenta un efecto bajo que, aunque se intenta compensar con la elección de los parámetros de la simulación, sigue afectando por la propia definición del canal.

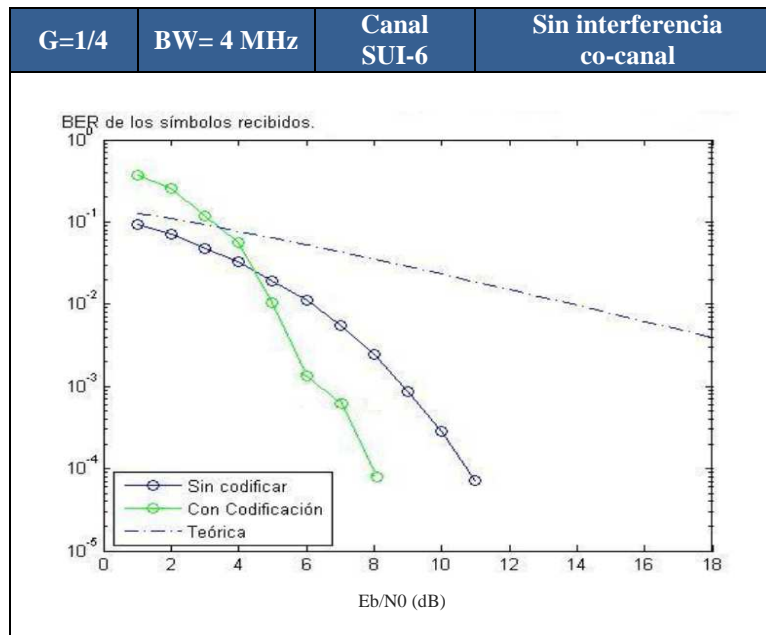
Si la hipótesis que se indica se corrobora, los resultados que se obtendrán mostrarán que el canal SUI-6 soporta un menor porcentaje de interferencia co-canal y dado que se está en un modelo de altas pérdidas, también soportará menor interferencia que el canal SUI-4, por lo que cabe esperar que una transmisión a través de un canal SUI-6 sea la comunicación que peor soporte la interferencia co-canal y por tanto, sea el sistema más vulnerable a este tipo de interferencia de los que se han analizado.

Expuesta esta primera hipótesis, se analizará el canal SUI-6 para comprobar si dicha hipótesis es correcta o, por el contrario, el canal reacciona de una forma distinta a la que cabría esperar.

2.3.7.1 Simulación canal SUI-6 sin interferencia co-canal

Ahora que se ha llegado al último análisis, primero se analizará cómo se comporta la comunicación cuando no existe interferencia co-canal, puesto que así se conocerá el comportamiento que tiene la simulación debido exclusivamente al canal estudiado, en este último caso, el SUI-6. Una vez se conozca la reacción que tiene este canal, se podrá estudiar el efecto que produce la interferencia co-canal sobre dicho canal.

La gráfica obtenida (Gráfica 25) con los parámetros explicados en la sección principal de este subapartado es:



Gráfica 25: Simulación canal SUI-6 sin interferencia co-canal

Al igual que ocurría con el otro canal perteneciente a este grupo tipo A, el canal SUI-5, este canal SUI-6 obtiene también niveles de BER muy buenos dado que se sitúan nuevamente entre 10^{-4} y 10^{-5} . Este resultado sorprende relativamente, puesto que en teoría se están estudiando canales que simulan un escenario con pérdidas medias-altas y sin embargo los resultados obtenidos son buenos. La explicación de este hecho está en que los parámetros que se han elegido de forma muy restrictiva, es decir, tienen un ancho de banda muy acotado y el prefijo cíclico es muy alto: 64 muestras.

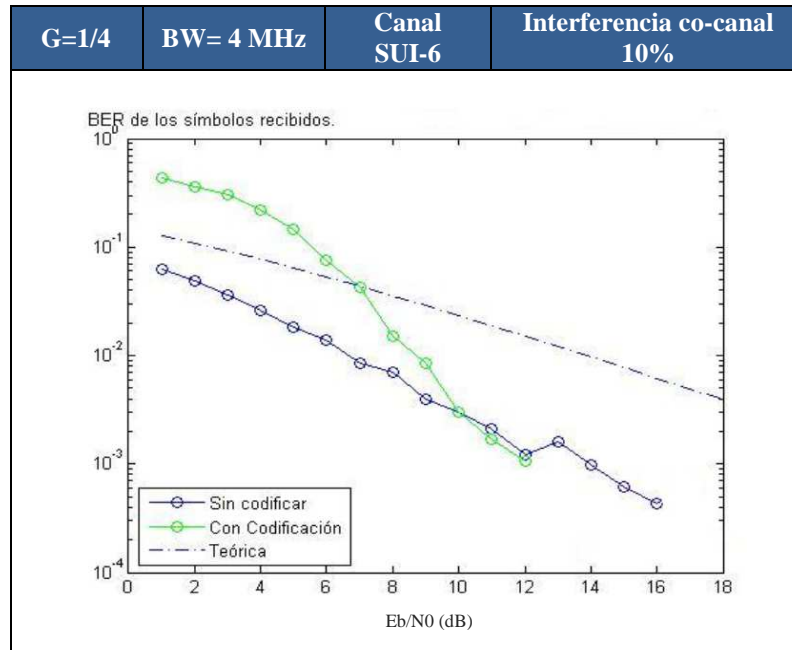
No solo los valores de BER son buenos, sino que el ratio SNR-BER también tiene resultado óptimos, puesto que al igual que pasaba con el canal SUI-5, la señal codificada solo necesita una SNR de 8 dB y la señal sin codificar de 11 dB para lograr los valores de BER indicados.

Una vez que se conoce cómo se comporta el canal SUI-6, se introducirá la interferencia co-canal para observar si soporta el mismo porcentaje de interferencia que soportaba el canal SUI-5 o, por el contrario, soporta menos interferencia debido a que presenta mayores pérdidas.

2.3.7.2 Simulación canal SUI-6 con porcentaje de interferencia co-canal al 10%

Gracias a los resultados obtenidos en el apartado anterior, ahora se analizará el efecto que produce la interferencia co-canal sobre el canal cuando se introduce un pequeño porcentaje de interferencia y ver, en primer lugar, cómo reacciona dicho canal a esa interferencia, y, en segundo lugar, comprobar si esa reacción es peor o mejor en relación al comportamiento que presentó el canal SUI-5 para el mismo porcentaje de interferencia.

La gráfica obtenida (Gráfica 26) para este caso se muestra a continuación:



Gráfica 26: Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 10%

En un primer vistazo, se observa que comparando este resultado con el obtenido cuando no existía interferencia (Gráfica 25), la comunicación ha sufrido bastante degradación a pesar de que el porcentaje de interferencia es pequeño.

Centrando la atención en los niveles de calidad, se puede observar que han disminuido, dado que están alrededor de 10^{-3} cuando, en el anterior caso, era de algo más de 10^{-4} . A pesar de esto, la comunicación sigue siendo posible puesto que, aunque han empeorado, los niveles de calidad se encuentran dentro de los márgenes razonables para asegurar la comunicación.

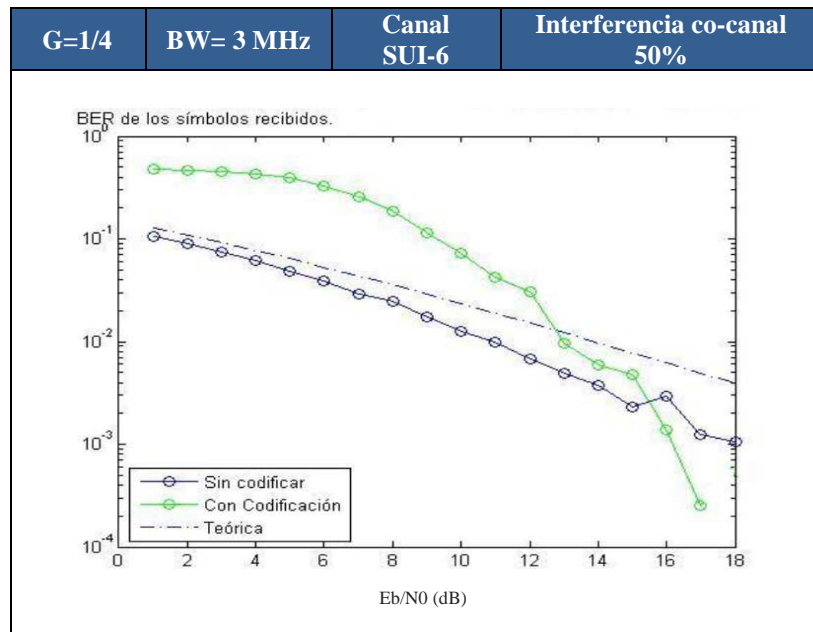
Haciendo foco en la relación señal a ruido, se aprecia que estos valores también han empeorado considerablemente. Mientras que antes, para la señal codificada, se requería un nivel de SNR de 8 dB ahora hacen falta 12 dB y, aún así, no se llega a conseguir la calidad del caso anterior. Lo mismo ocurre con la señal sin codificar, antes hacían falta 11 dB mientras que ahora son necesario 16 dB.

Dado los resultados expuestos, es fácil darse cuenta que el ratio BER-SNR ha empeorado considerablemente respecto al caso anterior, lo cual hace pensar que este canal soportará menos porcentaje de interferencia co-canal que el canal SUI-5.

2.3.7.3 Simulación canal SUI-6 con porcentaje de interferencia co-canal al 50%

Para comprobar la hipótesis que se ha lanzado en la última frase del apartado anterior, se ha elevado el porcentaje de interferencia co-canal al 50% y, según lo visto hasta ahora en las simulaciones de este canal, cabe esperar que la comunicación sufra una degradación importante.

La gráfica obtenida (Gráfica 27) se muestra a continuación:



Gráfica 27: Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 50%

Viendo la gráfica anterior, se observa que para el porcentaje de interferencia co-canal del 50% los resultados obtenidos son los peores si se compara con los obtenidos en el resto de canales.

Yendo más al detalle, se observa que los niveles de BER de la señal codificada se encuentran dentro de los niveles mínimos de calidad exigidos mientras que, si se observa la señal sin codificar, los valores de BER son peores de 10^{-3} , por lo que se está empezando a poner en compromiso la comunicación.

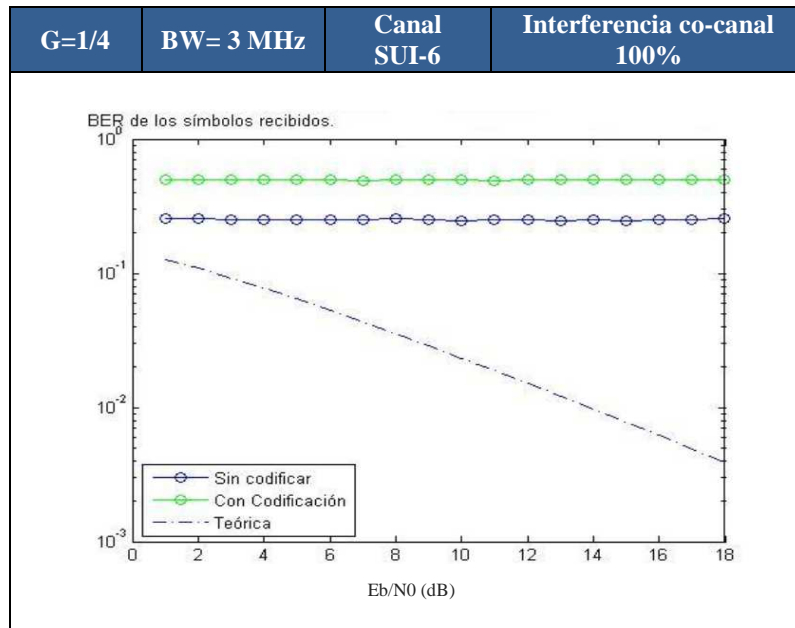
Haciendo foco en la relación señal a ruido, se aprecia nuevamente que se consiguen los peores resultados de las simulaciones que se han realizado puesto que, para conseguir los niveles de BER explicados anteriormente, tanto la señal codificada como sin codificar necesitan niveles muy altos de SNR. Concretamente, la señal codificada requiere un nivel de SNR de 17 dB y la señal sin codificar de 18 dB, los cuales, como se ha mencionado, son los más altos obtenidos hasta ahora.

Estos datos muestran que el ratio BER-SNR ha empeorado considerablemente y, tanto la señal codificada como sin codificar, están próximas a la simulación teórica, lo que lleva a pensar que este canal soportará poco más del 50% de interferencia co-canal. Esto se comprobará en el siguiente apartado cuando se eleve el porcentaje de interferencia.

2.3.7.4 Simulación canal SUI-6 con porcentaje de interferencia co-canal al 100%

Llegados a este punto, se ha alcanzado el final de las simulaciones de este trabajo. El último caso que queda por analizar es ver qué ocurre cuando la interferencia co-canal tiene un porcentaje entre el 50% y el 100%.

La gráfica que se muestra a continuación corresponde con un porcentaje de interferencia del 100%:



Gráfica 28: Simulación canal SUI-6 con porcentaje interferencia co-canal 100%

Como cabía esperar, en primer lugar por las simulaciones con este porcentaje de interferencia co-canal en otros canales y, en segundo lugar, porque la comunicación cuando el porcentaje de interferencia era del 50% estaba empezando a estar comprometida, los resultados obtenidos para el porcentaje del 100% hacen concluir que la comunicación se hace imposible.

Antes de llegar a dicho porcentaje, se fueron probando diversos porcentajes viendo que la comunicación solo soportaba un porcentaje de interferencia co-canal del 55% puesto que, a partir de ese porcentaje, la comunicación no se puede garantizar con una calidad aceptable.

Recordando los resultados obtenidos en otros canales, se aprecia que este canal es el que menos interferencia co-canal soporta, puesto que los demás han llegado a soportar porcentajes superiores al 60%. Esto es debido a que este canal es el canal que presenta mayores pérdidas que, en adición a la interferencia co-canal, hace que las pérdidas totales sean superiores que en los anteriores casos.

2.4 Reglas de planificación

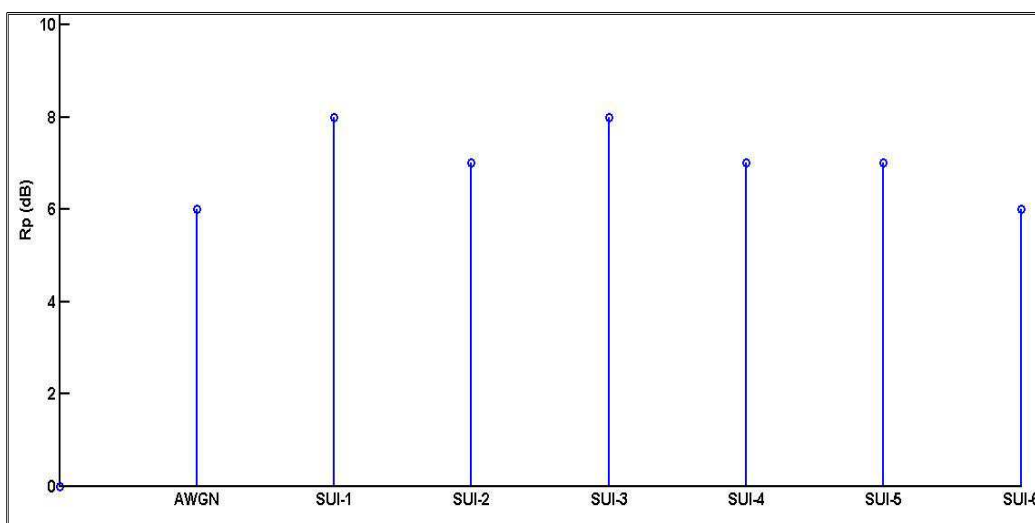
Llegado este punto en el que se conoce cómo reacciona cada canal en función del porcentaje de interferencia co-canal que se le introduce y, explicado cada resultado obtenido, a continuación, usando estos resultados mencionados, se intentarán hallar unas reglas de planificación que ayuden al diseño en un futuro despliegue concreto de esta tecnología.

Dado que dependiendo del porcentaje de interferencia co-canal introducido los resultados varían, se ha decidido estructurar este apartado en tres partes. En una primera sección, se realizará una gráfica que resuma el nivel de relación de protección en función del modelo de propagación usado cuando en la transmisión no existe interferencia co-canal. En la segunda sección, se realizará esta misma gráfica pero, en esta ocasión, existirá un porcentaje de interferencia co-canal del 10%. Por último, se finalizará este análisis con otra gráfica que muestre los mismos resultados que las dos anteriores pero habiendo introducido un porcentaje de interferencia co-canal del 50%.

Se ha decidido no realizar un análisis de la relación de protección para modelos con porcentaje de interferencia del 100% puesto que, como se explicó en secciones anteriores, en todos los canales que se da esta situación, la comunicación se hace imposible, por lo que no tiene sentido analizar la relación de protección en ese caso.

Para realizar estas nuevas gráficas, en primer lugar se ha fijado un nivel de BER de 10^{-3} para cada uno de los siete modelos de canal y para cada uno de los tres tipos de comunicación con interferencia, con lo que se ha conseguido obtener una gráfica por cada porcentaje de interferencia, mostrándose en ella la relación de protección para cada modelo de canal. Se ha decidido fijar el nivel de BER en un valor de 10^{-3} debido a que, durante todo este trabajo, se ha considerado que este nivel de BER asegura una comunicación con calidad.

Una vez que se ha explicado cómo se han realizado las gráficas que se mostrarán a lo largo de este apartado, a continuación se muestra la primera de las gráficas (Gráfica 29) que contempla los distintos modelos cuando no existe interferencia co-canal.



Gráfica 29: Relación de protección para modelos sin interferencia co-canal

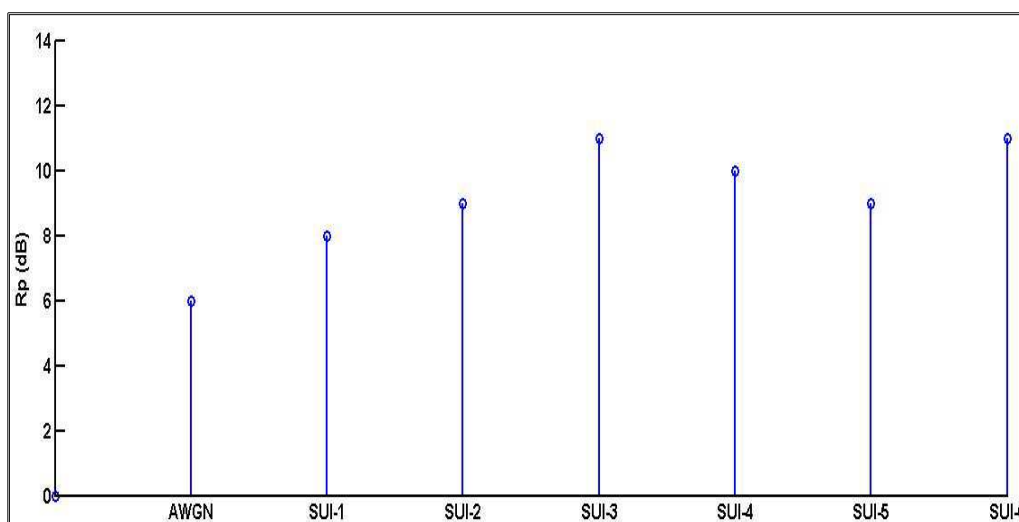
En la gráfica anterior (Gráfica 29), se observa un resumen de las relaciones de protección obtenidas dependiendo de los distintos canales que se han usado en la simulación de este trabajo. Estos niveles de relación de protección supondrán que a la hora de realizar el diseño del sistema, basta con tener en cuenta el canal implicado en la comunicación y ver qué valor mínimo de relación de protección hay que garantizar. Por este motivo, si se obtienen valores de relación de protección bajos supondrán mejores resultados que si se obtienen valores altos, puesto que indicará que funcionará la comunicación con un nivel de calidad aceptable sin necesidad de tener que exigir un nivel de señal mayor.

Aclarado esto, haciendo foco de nuevo en la gráfica obtenida (Gráfica 29), se observa que los niveles de relación de protección obtenidos varían de los 6 dB a los 8 dB, lo cual supone muy buenos resultados puesto que son valores bajos. Dado que se trata de un escenario en el que no existe interferencia co-canal, este resultado es un resultado correcto y previsible puesto que, si se hubieran obtenido niveles mayores, hubiera sido peor a la hora de una eventual introducción de interferencia co-canal teniendo que exigir, en ese caso, un nivel de señal aún mayor.

Analizando ahora los resultados según los grupos del modelo de propagación SUI, es decir, grupo A, B y C, se observa que para este tipo de escenarios en los que no existe interferencia co-canal, para cada grupo el mejor canal que se comporta es:

- Grupo C: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-2 puesto que tiene una relación de protección de 7 dB, mientras que el canal SUI-1 tiene un nivel de 8 dB.
- Grupo B: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-4 puesto que tiene una relación de protección de 7 dB, mientras que el canal SUI-3 tiene un nivel de 8 dB.
- Grupo A: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-6 puesto que tiene una relación de protección de 6dB, mientras que el canal SUI-5 tiene un nivel de 7 dB.

Habiendo analizado el caso en el que no existe interferencia co-canal en la transmisión, a continuación se mostrará la gráfica que se ha obtenido de la relación de protección cuando el porcentaje de interferencia co-canal se sitúa en el 10%. Para este caso cabe esperar que la relación de protección aumente puesto que, para compensar la interferencia introducida y que el sistema siga trabajando con un nivel de BER igual, el nivel de señal también habrá que subirlo, lo que implica, que la relación de protección salga mayor que cuando no existe interferencia co-canal.



Gráfica 30: Relación de protección para modelos con interferencia co-canal al 10%

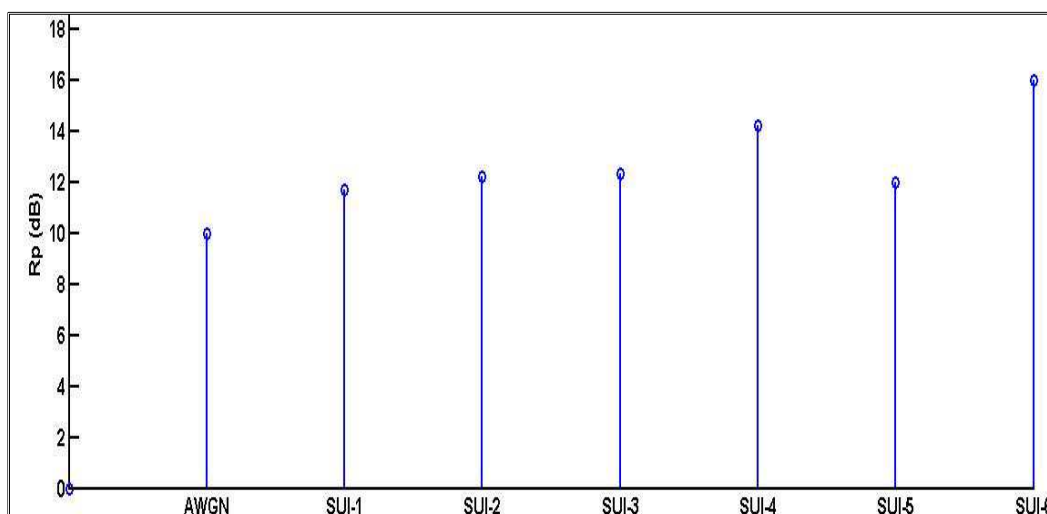
La gráfica superior (Gráfica 30) indica las relaciones de protección para cada canal cuando existe un porcentaje de interferencia co-canal al 10%. En ella se puede observar que los niveles de relación de protección se han elevado, lo cual, como ya se mencionó, son resultados lógicos. Dejando aparte el canal AWGN, que es un canal demasiado simple y que en diseño de transmisiones reales es mejor no usar puesto que no contempla diversos parámetros que se suelen dar en despliegues reales, se observa que los niveles de relación de protección varían entre los 8 dB y los 11 dB para el peor de los casos. Este se considera el peor caso, pero relativamente, porque como se observa la relación de protección para este escenario se mantiene entre unos niveles muy estables independientemente del canal utilizado.

A continuación se muestra un análisis de los canales de los grupos en los que está dividido el modelo de propagación SUI, para ver, dentro de cada grupo, cuál es el mejor canal en el escenario planteado:

- Grupo C: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-1 puesto que tiene una relación de protección de 8 dB, mientras que el canal SUI-2 tiene un nivel de 9 dB.
- Grupo B: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-4 puesto que tiene una relación de protección de 10 dB, mientras que el canal SUI-3 tiene un nivel de 11 dB.
- Grupo A: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-5 puesto que tiene una relación de protección de 9dB, mientras que el canal SUI-6 tiene un nivel de 11 dB.

Para finalizar con el análisis, como se avanzó en la introducción de esta sección, solo queda por analizar la relación de protección para cada canal cuando el porcentaje de interferencia co-canal alcanza el 50%.

La gráfica obtenida en este caso es la mostrada a continuación:



Gráfica 31: Relación de protección para modelos con interferencia co-canal al 50%

En la gráfica superior (Gráfica 31), los niveles de relación de protección han vuelto a aumentar respecto a los obtenidos para el escenario con interferencia co-canal del 10% (Gráfica 30). Además, como viene ocurriendo en las anteriores gráficas de esta sección, a pesar de haber aumentado el nivel de relación de protección, éste sigue siendo estable puesto que se sitúa para la mayoría de los canales entre los 10 dB y los 14 dB. Se indica que para la mayoría de los canales y no para la totalidad de los canales, porque estos valores se obtienen descartando el canal SUI-6, puesto que presenta el peor resultado con un nivel de 16 dB. Este valor más alto que el resto puede ser debido a que el escenario que modela el canal SUI-6 es un escenario de altas pérdidas que, añadido a haber elevado el porcentaje de interferencia co-canal, produce que sea necesario exigir un nivel de relación de protección mayor para asegurar el nivel de calidad fijado.

Al igual que se hizo en los casos anteriores de esta sección, a continuación se muestra un análisis de los canales de los grupos en los que está dividido el modelo de propagación SUI para ver, dentro de cada grupo, cuál es el mejor canal en el escenario planteado:

- Grupo C: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-1 puesto que tiene una relación de protección de 11,5 dB, mientras que el canal SUI-2 tiene un nivel de 11,7 dB.
- Grupo B: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-3 puesto que tiene una relación de protección de 12 dB, mientras que el canal SUI-4 tiene un nivel de 14 dB.
- Grupo A: el canal que presenta una menor exigencia de relación de protección es el canal SUI-5 puesto que tiene una relación de protección de 12 dB, mientras que el canal SUI-6 tiene un nivel de 16 dB.

Para finalizar con este análisis, destacar que cuando se tiene un escenario que presenta un porcentaje de interferencia co-canal elevado, como puede ser un porcentaje del 50%, por la relación de protección que presentan, los canales que mejor se comportan son los canales SUI-1, SUI-3 y SUI-5. Esto es debido a que estos canales representan modelos, que, por definición, presentan menores pérdidas que los canales SUI-2, SUI-4 y SUI-6, por lo que al introducir interferencia co-canal, hace que la soporten mejor.

3. CONCLUSIONES

En este apartado se intenta resumir las conclusiones sacadas en los estudios realizados de la interferencia co-canal en comunicaciones WIMAX con distintos tipos de canal, además de ofrecer una serie de conclusiones tanto a nivel técnico como económico de distintos aspectos relacionados con el estándar. Estas conclusiones son las que se exponen a continuación:

- A nivel técnico, la principal conclusión global que se puede sacar viendo los casos de éxito expuestos y los resultados obtenidos, es que actualmente se disponen de tecnologías suficientes como para superar los diversos problemas que se plantean en una comunicación, como puede ser es el caso de la interferencia co-canal. Aún así, el estudio realizado expone de manera clara cómo afecta dicha interferencia y sabiendo eso, se pueden dar soluciones tecnológicas ajustadas a este posible problema que, sin conocer cuál es su efecto, no se podría dar esa solución exacta y adecuada.
- Como se ha visto a través del estudio realizado, uno de los puntos primordiales a la hora de hacer el estudio de viabilidad de la comunicación, es conocer a la perfección el escenario donde se implantará el sistema WIMAX, puesto que como se ha visto en las simulaciones realizadas, el canal condicionaba el porcentaje de interferencia co-canal soportado.
- Dado que hacer una estimación de canal resulta sumamente difícil por las limitaciones que impone el propio programa de simulación utilizado, en este caso MATLAB, en este estudio se han usado canales estudiados y definidos de forma clara como son los canales pertenecientes al modelo SUI. Se han elegido estos y no otros por su frecuente uso en estudios reales de la tecnología WIMAX.
- Volviendo a los canales que se han utilizado, dado los resultados obtenidos, se ha visto que de los siete estudiados, se concluye que el que peor soportaba la interferencia co-canal era el canal SUI-6, perteneciente al grupo tipo A, mientras que el que mejor la soportaba era el canal AWGN y dentro de los modelos SUI, el canal SUI-1. Esto se debe a que el canal SUI-6 es el que modela un escenario con mayores pérdidas debido a que representa un escenario con colinas pequeñas, pero de abundante vegetación y, aún cuando se han intentado minimizar su efecto ajustando ciertos parámetros, la adicción de interferencia co-canal a estas pérdidas hace que se degrade la comunicación en exceso, aunque el porcentaje de interferencia co-canal no sea alto. Esta conclusión se refuerza observando la tabla resumen que muestro a continuación, en la que se muestran para cada canal, la relación de protección que se exige para una comunicación aceptable dependiendo de la interferencia co-canal introducida:

Porcentaje Interferencia co-canal	AWGN	SUI-1	SUI-2	SUI-3	SUI-4	SUI-5	SUI-6
0%	6 dB	8 Db	7 dB	8 dB	7 dB	7 dB	6 dB
10%	6 dB	8 dB	9 dB	11 dB	10 dB	9 dB	11 dB
50%	10 dB	12 dB	12 dB	12 dB	14 dB	12 dB	16 dB

Tabla 18: Resumen relaciones de protección

- Comparando los resultados del canal SUI-6 o del canal SUI-5, ambos pertenecientes al grupo tipo A de los modelos SUI, con los resultados obtenidos del canal SUI-4, se observa que comparativamente los datos obtenidos para este último canal son peores en contra de lo que se podía pensar, ya que el canal SUI-4 modela un escenario de montañas altas con vegetación de densidad media. Esto es debido a que en una comunicación WIMAX cuando existe interferencia co-canal, tiene mayor importancia la orografía del terreno que la propia vegetación que exista. Este hecho queda comprobado si se observan detenidamente los resultados obtenidos en los canales citados cuando no existía interferencia co-canal, puesto que en esa situación, los tres canales tenían comportamientos similares mientras que, cuando se ha añadido interferencia co-canal, ha sido cuando se ha comprobado esta conclusión.
- En adición al tema de las características de los distintos escenarios usados en la simulación de WIMAX con interferencia co-canal, otro hecho que ha quedado sobradamente probado después de este estudio, son las bondades que ofrece el sistema usando todas las etapas de codificación definidas por el estándar. Se ha visto de forma clara en el estudio realizado, que siempre se han obtenido mejores resultados al usar las codificaciones que sin usarlas, puesto que ante interferencias como la interferencia co-canal introducida, dota de un sistema mucho más robusto.
- Finalmente, dejando a un lado la parte técnica del estándar, si se hace foco a nivel económico, WIMAX destaca por ser una tecnología estandarizada, de bajo coste y con una viabilidad que hace de ella la solución perfecta para implantarse en cualquier lugar del mundo, con especial interés en zonas donde la infraestructura de cable sea escasa donde se convierte en la solución ideal para tener un acceso a la red con velocidades altas dentro de lo que ofrecen los sistemas inalámbricos.

4. LÍNEAS FUTURAS

En esta sección quiero indicar algunos de los trabajos o líneas de investigación futuras que se pueden estudiar a raíz del proyecto que he realizado.

Dado que en este estudio se trataba de observar el comportamiento de una comunicación WIMAX sobre distintos escenarios cuando existía interferencia co-canal, no se ha tratado de mejorar el efecto negativo que ésta produce, puesto que eso es justamente lo que se quería estudiar. En un trabajo futuro, sabiendo cómo afecta la interferencia co-canal sobre la comunicación de un sistema WIMAX, se puede tratar de corregir dichos efectos introduciendo técnicas como la modulación adaptativa, el uso de antenas inteligentes u otras de las soluciones que fueron planteadas en la sección 1.10 de este proyecto.

Otra de las posibles mejoras para trabajos futuros, puede ser el incluir algoritmos de estimación de canal para el estudio de escenarios no conocidos previamente. De esta forma, en cada instante de tiempo se podría conocer la situación del canal y cómo está afectando una posible interferencia co-canal a las muestras.

Para finalizar, como posible línea de investigación futura, se podría plantear otro estudio de la interferencia co-canal en comunicaciones donde se mezclen tecnologías inalámbricas, como por ejemplo en los casos en los que se use tecnología WIMAX para la red de core de una comunicación y la tecnología WiFi para la red de acceso.

5. PRESUPUESTO

1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

En este apartado del presupuesto se evalúan los costes de material y los costes de mano de obra.

Costes de material

- Ordenador Portátil con Microsoft Windows Vista
Este equipo tiene un coste por alquiler de 100 €/mes, habiendo sido alquilado durante 18 meses.
- Impresora láser
Este equipo tiene un coste por alquiler de 80 €/mes habiendo sido alquilada durante 1 mes.
- Material de oficina
Los gastos en material de oficina, impresión y encuadernación del proyecto se cifran en un total de 200 €.

Gastos de material

- Alquiler de ordenador portátil durante 18 meses1800 €.
- Alquiler de impresora láser durante 1 mes 80 €.
- Material de oficina 200 €.
- Total gastos de material **2.080 €.**

Costes de mano de obra

- Mano de obra
Para la realización del presente proyecto se han contratado los servicios de un mecanógrafo encargado de componer la totalidad del proyecto para su presentación. El coste por hora del mecanógrafo incluyendo todo tipo de gastos (Seguridad Social, impuestos, etc.) es de 10 €/hora

Mano de obra: 10 €/hora x 52 horas**520 €.**

Importe total del Presupuesto de Ejecución Material

- Total gastos de material2.080 €.
- Mano de obra 520 €.
- **TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL..... 2.600 €.**

El importe del Presupuesto de Ejecución Material asciende a DOSMIL SEISCIENTOS euros.

2. PRESUPUESTO TOTAL DE CONTRATA

Este proyecto se lleva a cabo por el procedimiento de contratación directa. Por ello, se añaden los siguientes porcentajes del Presupuesto de Ejecución Material para obtener el Presupuesto Total de Contrata:

- Un 15% en concepto de gastos generales y financieros, tasas fiscales, administrativas y demás gastos derivados de obligaciones del control del Proyecto.
- Un 7% en concepto de beneficio industrial.

Presupuesto total de contrata

• Presupuesto de Ejecución Material.....	2.600 €.
• Gastos Generales	390 €
• Beneficio Industrial	182 €
• PRESUPUESTO TOTAL DE CONTRATA.....	3.172 €

El importe del Presupuesto total de contrata asciende a TRES MIL CIENTO SETENTA Y DOS euros.

3. HONORARIOS FACULTATIVOS

Los Honorarios Facultativos son los recibidos por el Ingeniero; incluyen la elaboración del proyecto y su dirección.

Para la realización del proyecto, el ingeniero ha invertido 18 meses, valorándose el mes de trabajo en 2.000 €.

Total Honorarios Facultativos

10 meses x 2.000 €/mes **20.000 €.**

Los honorarios del Ingeniero del presente proyecto ascienden a VEINTE MIL euros.

4. IMPORTE TOTAL DEL PROYECTO

El Subtotal del presupuesto se obtiene sumando el Presupuesto Total de Contrata y los Honorarios del Ingeniero:

Subtotal del presupuesto

- Presupuesto Total de Contrata 3.172 €.
- Honorarios Facultativos 20.000 €.
- SUBTOTAL DEL PRESUPUESTO **23.172 €**

IVA APLICABLE

- 18% SUBTOTAL 4.170,96 €.

IMPORTE TOTAL DEL PROYECTO27.342,96€.

El presupuesto de este proyecto asciende a VENTISIETE MIL TRESCIENTOS CUARENTA Y DOS euros con NOVENTA Y SEIS céntimos, IVA incluido.

GLOSARIO

WIMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

BER (Bit Error Rate): tasa de error de bit.

BS Estación Base o Base Station.

FEC (Forward Error Correction): algoritmo para corrección de errores

LOS (Line of sight): visibilidad directa.

NLOS (No line of sight): no hay visibilidad directa.

MAC (Medium Access Control): control de acceso al medio.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): multiplexado por división de frecuencias ortogonal.

MIMO Multiple Input- Multiple Output. Sistema que utiliza múltiples antenas tanto para recibir como para transmitir.

BPSK Binary Phase Shift Keying. Consta de la modulación de desplazamiento de fase de 2 símbolos.

QAM (Quadrature Amplitude Modulation): familia de modulaciones digitales basadas en la variación de la amplitud de la señal

QPSK Quadrature Phase Shift Keying. Es una modulación de fase en cuadratura de amplitud constante utilizada para las emisiones digitales.

SNR Signal to Noise Ratio

SUI Stanford University Interim models

AWGN Additive white Gaussian noise

TDD Time-Division Duplexing

FDD Frequency-Division Duplexing

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sauter, M. (2009). *Bringing Networks, Terminals and the Web Together: LTE, WiMAX, IMS, 4G Devices and the Mobile Web 2.0*. Alemania: Wiley.
- [2] Katz, Marcos; Fitzek, Frank. (2009). *Wimax Evolution: Emerging Technologies and Applications*. UK: Wiley.
- [3] Ministerio de Educación (Gobierno de España). (2006). *Observatorio Tecnológico: Wimax*
- [4] Intel. (2003). *IEEE 802.16 and WiMAX*.
- [5] Wimax Forum. (2005). *WiMAX's technology for LOS and NLOS environments*
- [6] González García, P. (2006). PFC *Diseño de una herramienta de planificación de sistemas WIMAX*. Universitat Politècnica de Catalunya. España
- [7] Hikmet, S.; Buda, F. (2005). *Characteristics and compensation of multipath propagation in broadband wireless access systems*. Sequeans Communications.
- [8] Caycho, B. (2009). *Tecnologías fundamentales de WIMAX y elementos básicos de sus capas*.
(<http://wimax.comlu.com/tecnologia.php>).
- [9] IEEE. (2004). Std 802.16-2004
(<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2004.pdf>)
- [10] Pekka A. Ranta; Markku Pukkila. (1999). *Radio Aspects*. Kluwer Academic Publishers.
- [11] Villar Pascual, S. (2010). PFC *Red de Acceso de Banda Ancha mediante WiMAX Móvil*. Universidad Autónoma de Madrid. España
- [12] Acosta de la Vega, M.J. (2007). *Estudio comparativo entre la propuesta de IEEE 201.20 y el anexo E del estándar IEEE 802.15 para el acceso móvil inalámbrico de banda ancha*. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador
- [13] Antonello, G.; Yaghoobi, H.; Agrawal A. (2004). *Wimax*. Technical Working Group. Wimax Forum.
- [14] Yehia, H.; Kamal, H. (2008). *Inter-System Interference Effect on WiMAX Network Performance*. 3ª Conferencia Internacional de tecnologías de la información y comunicación.
- [15] Huesca Guevara, C.; Moreno Cruz, C. (2008). *Diseño y análisis de la capa física de las redes Wimax basado en la tecnología OFDM*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- [16] Casademont J. (2005). *Wimax, el germà gran del Wi-Fi*. Universitat Politècnica de Catalunya. España
- [17] Maqueda Gil, E. (2012). *La tecnología Wifi/Wimax: aspectos tecnológicos*. Diputación de Badajoz. España
- [18] Ergen, M. (2009). *Mobile broadband: including Wimax and LTE*. Springer
- [19] Nuaymi, E. (2007). *Wimax technology for broadband wireless access*. John Wiley & Sons
- [20] Agüero Calvo, R. (2010). *Dimensionado de sistemas celulares*. Universidad de Cantabria. España
- [21] Carlos Batllés Ferrer. (2007). *Estudio y Simulación de la capa física de la norma 802.16d (WiMAX)*. Master's thesis. Universidad de Sevilla. España
- [22] IEEE. (Julio 2001) Std 802.16.3c-01/29r4—*Channel models for fixed wireless applications*.
- [23] Agencia Efe. (Marzo 2012). *Menorca es WIMAX*. Periódico El Mundo. <http://www.elmundo.es/elmundo/2012/03/12/navegante/1331542078.html>
- [24] Quobis Networks. (Julio 2006). *WIMAX la revolución inalámbrica*
- [25] Avilez Rosas, D.; Hernández López, O.; Ortega Solís, C. (2008). *Diseño del enlace para redes basadas en el estándar IEEE 802.16*. Instituto Politécnico Nacional. Mexico
- [26] Yang Xiao; Yi Pan. (Abril 2009). *Emerging Wireless LANs, Wireless PANs and Wireless MANs - IEEE 802.11, IEEE 802.15, 802.16 Wireless Standard Family*. John Wiley & Sons.
- [27] Valkanas, A. (2004). *Adaptative space-frequency coding for multiple-input and multiple-output orthogonal frequency division multiplexing systems*. University of Alabama. EEUU
- [28] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (www.ieee.org)
- [29] WIMAX FORUM. (www.wimaxforum.org)
- [30] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). *IEEE 802.16™: Broadband wireless metropolitan area networks (MANs)*. (<http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>)
- [31] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2012). IEEE 802.11 (<http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11aa-2012.html>)

[32] IEEE P802.16a (2002): “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Wireless Access Systems — MediumAccess Control Modifications and Additional Physical Layers Specifications for 2–11 GHz,”

[33] Caraguay, S. (2011). “Simulación de la red inalámbrica de banda ancha con tecnología Wimax para el estado de Colima”. Universidad de Colima. México