



**Universidad Nacional
Autónoma de México**



Facultad de Ingeniería

**Modelado de la Capa Física para redes
WiMax (IEEE 802.16)**

**Tesis que para obtener el título de
Ingeniero en Computación**

**Presenta:
David Cruz del Corral**

**Director de Tesis:
Dr. Víctor Rangel Licea**

**Cd. Universitaria, México, D.F.
Agosto 2007**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A Dios por cuidarme y guiarme siempre, por estar conmigo en todos los momentos. Por dejarme contemplar, por darme la fuerza para terminar mis metas.

A mi familia:
Por haberme dado la oportunidad de convivir con ellos, y aprender constantemente lo que es el amor, lo que es el trabajo y la perseverancia.

A ti Emma, por haber entrado a mi vida.

A todas las personas cercanas que están vivas y a las que no están por haber estado junto a mí.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a la UNAM por haberme formado como Ingeniero, por darme las herramientas para desarrollar y la creatividad necesaria para resolver cualquier problema.

A mi asesor el Dr. Víctor Rangel Licea por haberme apoyado todo el tiempo en la creación de mi tesis, agradezco su creatividad y tolerancia.

A todos mis amigos y seres sintientes, por deleitarme con su amor y enseñanzas.

Al Programa de Apoyo a Proyectos e Innovación Tecnológica por permitirme pertenecer al grupo de becarios, PAPPIT 1N104907-3.

Índice

Capítulo 1 Introducción

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema.....	2
1.3 Investigación relevante en el la capa física.....	3
1.4 Objetivos y contribuciones.....	4
1.5 Estructura de la tesis.....	4

Capítulo 2. Descripción de la tecnología BWA (Broadband Wireless Access)

2.1 Introducción.....	6
2.2 Antecedentes.....	6
2.3 Arquitectura Básica de un sistema BWA.....	8
2.4 Normalización.....	10
2.4.1 Bandas No Licenciadas.....	10
2.4.2 Estándares.....	11
2.4.3 Tecnologías alternas.....	13
2.4.3.1 Bluetooth.....	13
2.4.3.2 WiFi o WLAN IEEE 802.11.....	13
2.4.3.3 HomeRF.....	14
2.4.3.4 UWB (Ultra Wide Band).....	14
2.5 Conclusiones.....	15

Capítulo 3. El Estándar IEEE 802.16

3.1 Introducción.....	16
3.2 Panorama.....	16
3.2.1 Características.....	17
3.3 Evolución del estándar IEEE 802.16.....	18
3.4 Capa Física.....	19
3.4.1 Modelo de Referencia.....	20
3.4.1.1. Modo de operación capa física.....	22
3.4.2 Elementos de la capa física.....	24
3.5 Conclusiones.....	30

Capítulo 4. Diseño del Modelo de Simulación

4.1 Introducción	31
4.2 Diagrama de Bloques	31
4.3 Descripción de cada uno de los módulos.	33
4.3.1 Generador Binario con distribución Bernoulli	33
4.3.2 Codificador Convolutivo	35
4.3.3 Modulador	36
4.3.4 Canal con ruido aditivo Gaussiano	43
4.3.5 Demodulador	45
4.3.6 Cuantizador.....	46
4.3.7 Decodificador de Viterbi	48
4.3.8 Cálculo de la razón de error.....	49
4.3.9 BER (Razón de Bit de Error).....	51
4.4. Conclusiones.....	52

Capítulo 5. Resultados

5.1 Introducción.....	53
5.2 Modelo para el cálculo del BER.....	53
5.3 Análisis de desempeño	62
5.3.1 Escenario para el Código Convolutivo de 1/2.....	63
5.3.2 Escenario para el Código Convolutivo de 1/3	73
5.4 Conclusiones.....	77

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 Discusiones	78
6.2 Trabajo Futuro	78
6.3 Contribuciones.....	79
6.4 Conclusiones Finales	80

Referencias	81
--------------------------	-----------

Apéndice A	83
-------------------------	-----------

Apéndice B	86
-------------------------	-----------

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Con la notable necesidad de transmitir información a nivel masivo, integrar de manera eficiente y procesar toda esta información, se han desarrollado múltiples tecnologías las cuales, habían cumplido con los requerimientos en décadas pasadas. Principalmente en el área de redes locales, lo cual traía muchos impedimentos en la comunicación con otros usuarios que no estuvieran dentro de un mismo dominio. Pronto se pensó en una solución por parte de las compañías para poder proveer de un servicio rápido y lo suficientemente barato para los consumidores de uso residencial. Se han creado tecnologías como ADSL o DSL que nos pueden ofrecer tasas de transmisión de hasta 8Mbps, estas tecnologías han demostrado ser eficientes y muy útiles, proveen seguridad, son prácticamente inmunes al ruido, el único problema es que son alámbricos, tienen que ser redes bien diseñadas por que una pequeña modificación o integración de un usuario puede ser una travesía. Por otro lado se están abriendo campo las tecnologías inalámbricas debido a su gran adaptabilidad, nos traen múltiples ventajas tales como alta escalabilidad, movilidad, fácil instalación, bajos costos de mantenimiento, actualización entre otros.

Las transiciones entre los sistemas de comunicación siempre obedecen a múltiples necesidades, cuando se conceptualizó la 2da generación GSM (Global System for Mobile Communication Europa, IS-136 e IS-95 en USA) se busco cubrir la deficiencia en la saturación del espectro reservado para las comunicaciones celulares que estaba predefinida para 800 MHz, resolviendo este problema a través de la modulación. La introducción de tecnología inalámbrica de 3ra generación no se ha dado como respuesta a la saturación del espectro radioeléctrico, sino con la finalidad de ofrecer nuevos servicios de telecomunicaciones a los usuarios, enfocándose principalmente hacia la transferencia de voz y de datos con una velocidad máxima de 2Mbps, aunque esta tasa de transmisión parece ser alta los servicios para la transmisión de imágenes y video en tiempo real requieren de velocidades superiores a los 10Mbps.

Se busca mejorar la eficiencia de aspectos relacionados con el soporte de movilidad y calidad de servicio extremo a extremo, así como aspectos afines con la autenticación, autorización, contabilidad (AAAC) y seguridad en un entorno basado en el uso del protocolo IP como elemento básico de partida. [1]

Es necesario ofrecer servicios distintos, estos deben cumplir con las normas de calidad indispensables para cada servicio de triple play (voz, datos y video), lo cual

es campo de acción de la 4ta generación, haciendo uso de tecnología de punta en Radio Frecuencia RF, protocolos de Acceso al Medio MAC, algoritmos de código, redes celulares e integrando estos en un sistema de acceso de banda ancha.

1.2 Definición del problema.

La creciente necesidad por contar con servicios de comunicaciones eficientes con calidad y además robustas, nos brinda la oportunidad de desarrollar módulos que contemplen las técnicas de modulación y codificación en la capa física para la transmisión de datos, mejorando pro activamente la eficiencia del espectro de radiofrecuencia mediante distintos tipos de modulación y codificación. De esta manera se busca conseguir mejoras en la funcionalidad adaptándose a parámetros importantes como son la capacidad y velocidad del canal en base a la relación señal a ruido.

Para este propósito se ha desarrollado el protocolo IEEE 802.16 (WiMax) que está en etapa de crecimiento e investigación, pretende romper las barreras físicas y de costos que limitan la expansión mundial de la red.

Esta tecnología tiene como función principal proveer servicios de banda ancha en última milla con calidad en el servicio, a través de un medio inalámbrico, el cual busca cubrir grandes zonas en donde no se encuentre la infraestructura para hacerlo mediante estructuras alámbricas.

Dentro de las características mas novedosas de WiMax están los diferentes tipos de modulación a los que se pueden acceder, de esta manera decimos que la modulación se adapta al medio dependiendo de las condiciones de interferencia y ruido en el canal.

Pensando en uno de varios escenarios como puede ser la estación suscriptora o usuario se encuentren lejos de la estación base, la posibilidad de ruido aumenta y con esto el número de errores por cada bit de información.

Además existe la probabilidad de que el usuario se encuentre relativamente cerca, y que la capacidad en la transferencia se vea sesgada por el tipo de modulación.

Esta tesis forma parte del proyecto de investigación PAPPIT IN104907-3: "Técnicas de mejoramiento de capacidad de redes inalámbricas de banda ancha tipo mesh", y pretende establecer las herramientas para la implementación de las modulaciones dentro del modelo que se viene realizando dentro del laboratorio de

redes inalámbricas en la Facultad de Ingeniería el cual está desarrollando la modulación OFDM¹ (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales).

1.3 Investigación relevantes en el la capa física

En la actualidad se están realizando múltiples investigaciones en el campo de comunicaciones de Banda Ancha proporcionando diversas teorías para la transmisión de datos. En nuestro caso estaremos enfocados en aquellas que cumplan con nuestro propósito de establecer esquemas para el análisis probabilístico dependiendo del tipo de modulación y codificación.

Existe el enfoque de utilizar una técnica de modulación adaptativa que se rija en bases a las características demandadas en el servicio. Para el canal de voz se utiliza una modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying) y en el caso de datos se usa la modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation) [2]. Cuando el usuario se encuentre cercano a la estación base se concederá la mayor parte de la potencia a la transmisión de datos, a medida que el usuario se aleje de la estación base. Se empezara a conceder mayor ancho de banda así se cumplirá con los requerimientos mínimos para la transmisión de voz sean cubiertos.

Otra propuesta se basa en buscar formatos de modulación, en base al tipo de sistema, dependiendo del origen y complejidad de este, enviando paquetes de información que determinen en base a pruebas de error o trabajos analíticos que tipo de codificación y modulación son necesarios para ese escenario. Pudiendo corregir los errores por pérdidas en la trayectoria o ruido que es agregado al canal. [3]

Adicionalmente se busca que la información viaje a través de multicanales, pudiendo eficientar el uso del canal, para evitar interferencia entre símbolos. Se toma en cuenta que las subportadoras sean ortogonales, esta técnica empieza a tomar presencia en todos los medios de transmisión debido a su alta eficiencia [4].

En el caso del modelado de esquemas de error para canales inalámbricos, los modelos se basan en asumir que la transmisión de los paquetes son independientes y se distribuyen de una manera idéntica.

Aunque esto no es cierto en la parte práctica, se asegura que los errores producidos por desvanecimiento en la señal pueden ser corregidos a través de mecanismos correctores en base a la memoria del canal. [5]

¹ OFDM Técnica de modulación que consiste en enviar la información a través de un conjunto de portadoras con diferentes frecuencias.

La distribución del tamaño de error por evento es necesario para ser transmitido dentro de los parámetros de los paquetes IP en la transmisión sobre sistemas de comunicación UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [6].

1.4 Objetivos y contribuciones.

El principal objetivo de la investigación es realizar investigación de punta, que nos permita entrar a los primeros niveles de conocimiento de redes de alta capacidad en banda ancha, aportando las bases y recomendando parámetros importantes en la resolución para la transmisión de información.

En base a los modelos teóricos se buscará crear las simulaciones adecuadas en Matlab, pudiéndose alterar los parámetros como el tipo de modulación, la codificación, la proporción en que el ruido gaussiano influye en el canal, la cantidad de bits a transmitir y la relación señal a ruido (SNR).

En esencia se implementará un modelo capaz de integrar los diferentes tipos de modulaciones con códigos convolucionales, a la salida deberemos visualizar las graficas de BER (Bit Error Rate), SER (Symbol Error Rate) y PER (Packet Error Rate).

Con los resultados se pretende dar recomendaciones para la transmisión de datos, en base a la relación señal a ruido y a las sugerencias dadas por la IEEE para asegurar una cierta calidad del servicio.

Estos resultados formarán la base para trabajos futuros en el modelado de redes WiMax que se viene implementando en el laboratorio de redes inalámbricas, en el Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería, en donde se desea integrar la técnica de modulación adaptativa a través de múltiples portadoras (OFDM).

1.5 Estructura de la tesis

Esta tesis se divide en 6 capítulos, el primero muestra una introducción del tema a desarrollar.

El capítulo 2 presenta información relevante a la evolución y los sistemas de comunicación de banda ancha (BWA), las principales características propuestas en los protocolos como lo es IEEE 802.16, se concluye con una revisión de las tecnologías alternas para accesos digitales de alta velocidad.

El capítulo 3 presenta una descripción general del protocolo 802.16, su evolución a través de las distintas versiones. Su capa MAC (Media Access Control) y la capa física que es el objeto de estudio de la tesis.

En el capítulo 4 se crea un simulador basado en expresiones teóricas para poder calcular el BER, PER y SER. Además se elaboró el modelo de simulación que se basa en parámetros como son el tamaño del paquete, su velocidad de transmisión, los polinomios para el código convolucional, el tipo de modulación, su frecuencia, la relación señal a ruido y la cantidad de ruido gaussiano que afectara al canal, de manera que se puedan crear distintos escenarios.

En el capítulo 5 se desarrollan diferentes escenarios modificando cada uno de los parámetros, con esto se busca analizar el comportamiento del protocolo IEEE 802.16 con distintas modulaciones y códigos convolucionales. Obteniendo con esto las diferentes tablas de BER para escenarios diversos.

Finalmente en el capítulo 6 se exponen las conclusiones a las que se ha llegado después de haber evaluado los distintos escenarios dando algunas recomendaciones y concluyendo con los elementos para el desarrollo de nuevos proyectos basados en el BER y que complementen a la capa física.

Capítulo 2. Descripción de la tecnología BWA (Broadband Wireless Access).

2.1 Introducción.

En este capítulo se presenta una descripción general de la tecnología BWA, los estándares los cuales se han venido desarrollando y además que trabajen de manera análoga con la capa física de WiMax.

Las redes inalámbricas de banda ancha se definen como las redes de comunicaciones capaces de transmitir información en grandes cantidades y con una alta tasa de transferencia.

Básicamente estas redes se diferencian de las convencionales (alámbricas) en la capa física, y en la capa de enlace de datos (MAC). Según el modelo de referencia OSI, la capa física nos indica como son enviados los bits de una estación a otra, mientras la capa MAC se encarga de describir cómo se empaquetan y verifican los bits de manera que no contengan errores.

La modulación encargada del uso eficiente del espectro radioeléctrico y la codificación han sido consideradas para salvaguardar la integridad de los datos, estas son base de estudio por la comunidad científica.

2.2 Antecedentes.

Las tecnologías de radio de estándares abiertos a menudo ofrecen ventajas a los WISPs (proveedores de servicio de Internet inalámbrico) y a los usuarios. Por primera vez, el apoyo de la industria y la innovación están impulsando las tecnologías de redes inalámbricas de banda ancha. Los operadores de red, proveedores de servicio y usuarios se benefician de una amplia gama de productos de alto desempeño, ricos en recursos y baratos.

Estas tecnologías están proyectadas para un segmento de uso específico:

- Redes personales (PANs)
- Redes locales (LANs)
- Redes de áreas metropolitanas (MANs)
- Redes de áreas extensas (WANs)

Los requisitos para cada segmento de uso se basan en la variedad de variables, e incluyen:

- Necesidades de ancho de banda
- Necesidades de distancia
- Energía
- Localización del usuario
- Servicios ofrecidos
- Propiedad de la red

La Figura 2.1 muestra las organizaciones de estándares inalámbricos junto a sus recursos (ancho de banda y distancia) mapeados para los cuatro segmentos de uso mencionados anteriormente.

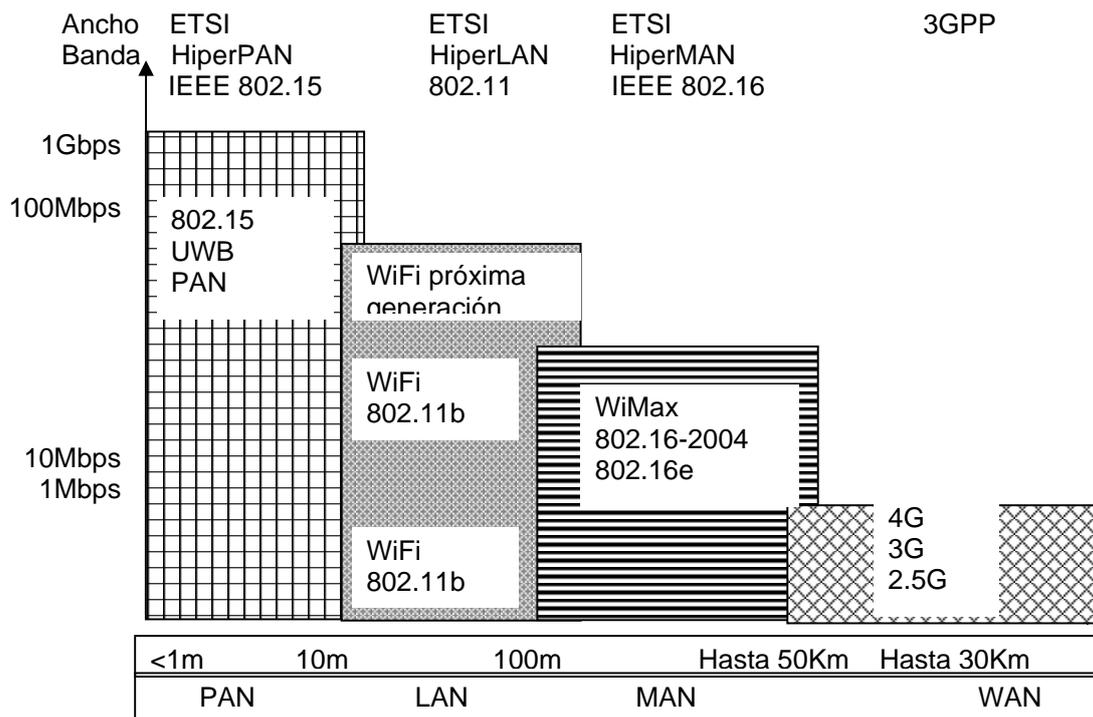


Figura 2.1 Estándares Inalámbricos.

Dentro de las organizaciones internacionales que regulan el crecimiento de estas tecnologías y crean las normas para un desenvolvimiento adecuado e interoperabilidad entre los diferentes esquemas están:

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI)
- Third Generation Partnership Project (3GPP)

Los estándares IEEE y ETSI son interoperables y su enfoque primario son las redes inalámbricas basadas en paquetes. El estándar de 3GPP se enfoca en sistemas móviles celulares y de tercera generación.

2.3. Arquitectura Básica de un sistema BWA

Un sistema *BWA* está compuesto por al menos una estación base *BS* (*Base Station*) y una o más estaciones suscriptoras *SS's* (*Suscriber Stations*). La *BS* y las *SS's* conforman la interfaz aérea del sistema *ODU* (*Outdoor Unit*), en donde se incluye los transmisores, receptores y antenas. Por otro lado, se encuentra la interfaz alámbrica *IDU* (*Indoor Unit*) que es la interfaz que permite el acceso hacia y desde las redes *backbone* de datos y *PSTN*. Las dos interfaces se interconectan a una frecuencia intermedia. Esto se puede ver en la figura 2.2

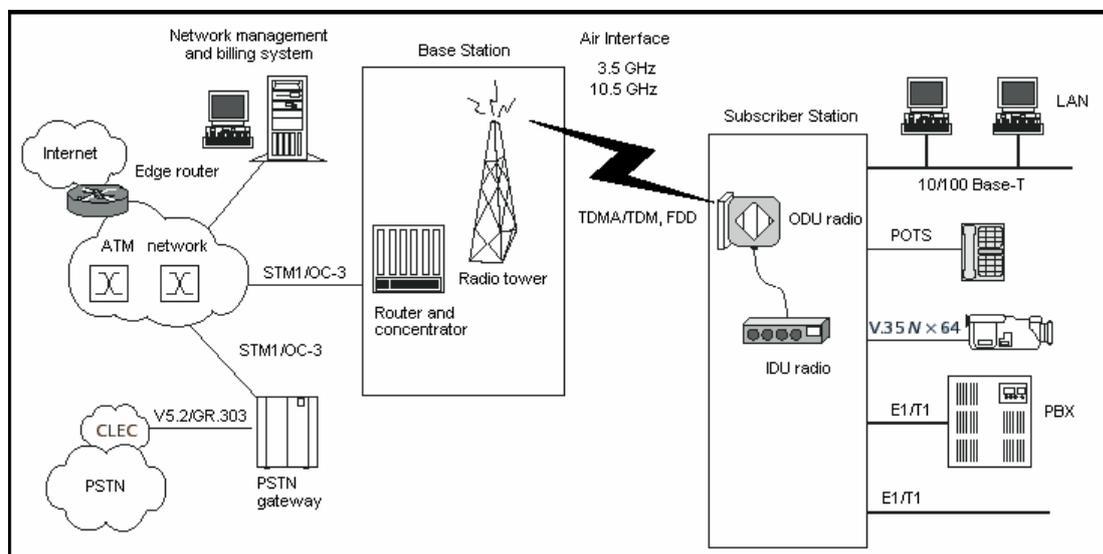


Figura 2.2 Arquitectura BWA.

La *BS* le asigna un canal de radio a cada una de las *SS*'s de acuerdo a las políticas de control de acceso al medio (*MAC*). Todos los sistemas *BWA* constan de tres subsistemas, los cuales se citan a continuación:

- *Sistema de Radiofrecuencia*: Es la parte inalámbrica de alta capacidad que permite la transmisión y recepción de las señales con cada *SS*. En la estación base, los módulos de transmisión y recepción están conectados en un lado con el equipo de acceso de datos de la *BS* y por otro lado con una antena cuyas características dependen de los requisitos del sistema. Las estaciones remotas tienen un módulo transmisor-receptor donde se recibe la señal de bajada de la *BS* y la pasa al módem de cada *SS*. Asimismo, recibe el tráfico de la *SS* y lo trasmite hacia la *BS*.
- *Sistema de Acceso*: Representa la interfaz de comunicación entre la *SS* y la *BS*, es el responsable de la estructuración y manejo del tráfico de señal de bajada o de subida con dirección al sistema de radiofrecuencia. En una red *BWA*, las *SS*'s comparten en el tiempo los canales de subida *UL* (*Up Link*) y de bajada *DL* (*Down Link*). En el enlace de subida, el canal es usualmente ranurado permitiendo así el acceso al canal mediante la técnica *TDMA*, en el canal de bajada se emplea el esquema *TDM*. Cada *SS* puede entregar voz y datos utilizando interfaces comunes, por ejemplo, *Ethernet*, *E1/T1*, etc.
- *Interfaz de red en la BS*: Representa la conexión entre el proveedor de servicios y la red *IP*, las principales aplicaciones que se usan con el sistema de acceso a Internet, acceso a alta velocidad a servicios multimedia, además del acceso a la *PSTN* para aplicaciones *VoIP*. En el lado de la *SS*, es la red de conexión con el sistema inalámbrico.

2.4 Normalización

Los estándares tienen la función de recomendar o establecer las normas para el funcionamiento adecuado de un sistema de comunicación.

Dentro de esta normalización se encuentra el uso de bandas libres o no licenciadas las cuales pueden ser usadas por cualquier persona o compañía, estas deben estar orientadas a fines industriales, científicos o médicos. Y las licenciadas, estas son bandas usadas para ofrecer distintos servicios, para los cuales se debe competir.

2.4.1 Bandas No Licenciadas

ISM Bands (Industrial, Scientific and Medical bands)

Las bandas ISM para sistemas de comunicaciones digitales inalámbricas empleando la radiofrecuencia, son aquellas que no necesitan licencia (siempre

que no se pasen los límites de potencia) y además son gratuitas. Las frecuencias de trabajo estandarizadas son: 314 MHz en USA (potencia máxima +30 dBm), 434 MHz (+10 dBm) y 868 MHz (+14 dBm) en Europa en AM o FM. En la tabla 2.1 se muestran las bandas no licenciadas.

Rango de Frecuencia (MHz)	Aplicaciones
433.05-434.79	Propósito general
868.00-868.6	Propósito general
868.6-869.2	Dispositivos de alarma
869.2-869.25	Propósito general
869.25-869.3	Dispositivos de alarma social
869.3-869.4	Protocolo EACM
869.4-869.65	Propósito general
569.65-8.69-70	Dispositivos de alarma
8.69.70-870	Propósito general

Tabla 2.1 Bandas No Licenciadas.

2.4.2 Estándares

Los estándares se han venido desarrollando en diferentes regiones y países, dependiendo de la situación política y comercial como lo puede ser el uso de frecuencias licenciadas o no licenciadas, cambian dependiendo de las organizaciones que rigen en cada país por ejemplo en los Estados Unidos de Norte América se define como LMDS (Local Multipoint Distribution Service)[8], IEEE 802.16[9] y BWA, mientras en la comunidad europea se conoce como BRAN (Broadband Radio Access Network)[10], en otros países como Canadá estos son referidos como Sistemas de Comunicación Multipunto Locales (LMCS)[11].

ETSI-BRAN

Dentro de la familia BRAN, se pueden reconocer distintas tecnologías las cuales se pueden categorizar dependiendo de la utilidad que tengan y en la banda en que operen.

A continuación en la figura 2.3 se muestra un resumen de estas tecnologías en donde se indica su velocidad de transmisión y la banda en la que trabajan.

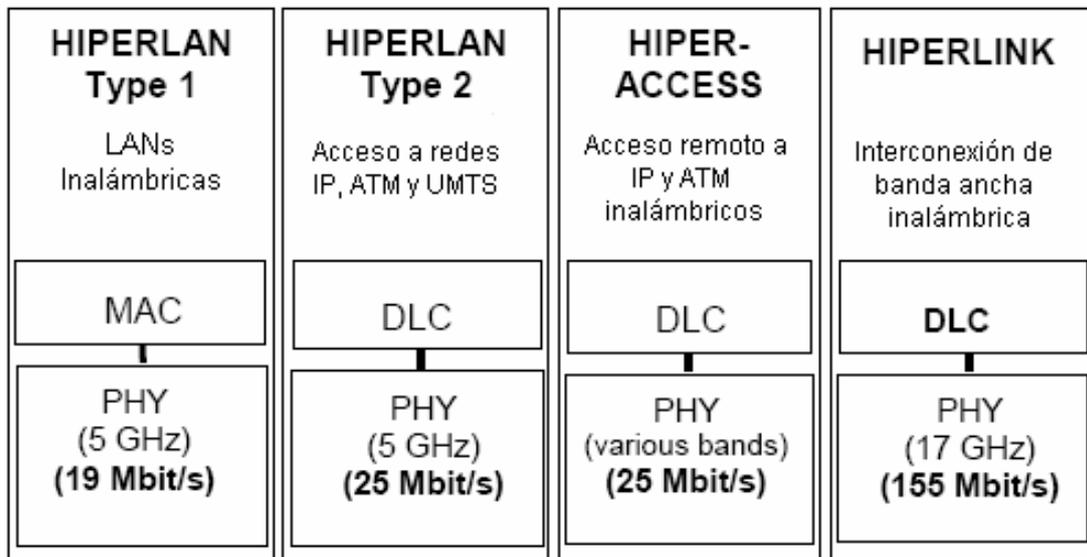


Figura 2.3 Estándares BRAN.

Los sistemas HIPERACCESS conectados principalmente a residencias, oficinas, y pequeñas y medianas empresas, tienen como premisa el tener acceso a una gran variedad de servicios de telecomunicaciones tales como voz, datos, y servicios

multimedia con velocidades de transmisión de los 2 Mbps a los 25Mbps. Los sistemas HIPERACCESS serán principalmente usados como redes de acceso remoto de banda ancha. El espectro puede ser en el rango de 2-40 GHz.

La segunda aplicación a la cual se hace referencia, HIPERLAN, provee acceso local con una calidad de servicio controlada para aplicaciones de banda ancha a computadoras portátiles, usando principalmente la banda de 5 GHz.

La tercera aplicación de BRAN es llamada HIPERLINK, y es principalmente una interconexión red a red que podrá soportar una variedad de protocolos y todos los escenarios posibles de tráfico. Esta aplicación podrá ser usada con velocidades de transmisión arriba de 155 Mbps en partes del espectro de 17 GHz.

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

WiMax es una tecnología inalámbrica MAN (Metropolitan Area Network) que conectará con IEEE 802.11(WiFi) a Internet y proporciona una extensión inalámbrica al cable. IEEE 802.16 proporciona hasta 50 km de rango de área lineal de servicio y permite usar conectividad sin una línea de vista directa a la estación base. La tecnología proporciona velocidades de transmisión de hasta 70 Mbit/s.

Trabaja en una banda desde 2GHz hasta 66 GHz, en este capítulo no se hará una descripción de la evolución de este estándar ya que será detallada en el capítulo 3.

2.4.3 Tecnologías alternas

2.4.3.1 Bluetooth

Bluetooth es un sistema de comunicación inalámbrico que aparece asociado a las Redes de Area Personal Inalámbricas en inglés WPAN (Wireless Personal Area Network). Esta nueva especificación está establecida para el enlace entre dispositivos de voz y datos a corto alcance, de forma fácil y simple Bluetooth opera en una banda no licenciada ISM de 2.4-2.5GHz permitiendo la transmisión de voz y datos, de forma rápida y segura con un rango de hasta 10 metros con 1 miliwatio o 100 metros si se usa un amplificador con 100 miliwatios.

Puede transferir datos de forma asimétrica a 721 Kbps y simétricamente a 432 Kbps. Se puede transmitir voz, datos e incluso vídeo. Para transmitir voz son necesarios tres canales de 64 Kbps, para transmitir vídeo es necesario comprimirlo en formato MPEG-4 y usar 340 Kbps para conseguir refrescar 15 veces por segundo una pantalla VGA de 320x240 puntos.

Bluetooth minimiza la interferencia potencial al emplear saltos rápidos en frecuencia (1600 veces por segundo).

La nueva especificación 2.0, soportará velocidades de 4, 8 y 12 Mbps, dependiendo del dispositivo, pero todas ellas compatibles entre sí. Por otro lado, se proporcionará un nivel de acceso al medio más eficiente que garantice los tiempos de respuesta de aplicaciones de audio y vídeo en tiempo real. La distancia seguirá siendo unos 10 metros y consumirá el doble de potencia.

2.4.3.2 WiFi o WLAN IEEE 802.11

Es un sistema de comunicación inalámbrico WLAN (Wireless Local Area Network) que se utiliza para redes de PC y periféricos. Lo inició un consorcio de diferentes compañías en 1990.

La transmisión de datos trabaja en modo bidireccional con un protocolo CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), que evita colisiones monitorizando el nivel de señal en la red, con las siguientes características:

- 802.11 2Mb/s trabajando en la frecuencia de 2.4GHz
- 802.11 b 11Mb/s trabajando en la frecuencia de 2.4GHz
- 802.11 g 55Mb/s trabajando en la frecuencia de 2.4GHz
- 802.11 a 55Mb/s trabajando en la frecuencia de 5.7GHz

2.4.3.3 HomeRF

El grupo de trabajo HomeRF desde 1998 ha desarrollado una sola especificación SWAP (Shared Wireless Access Protocol) para un amplio rango de dispositivos de gran consumo que pueden trabajar entre ellos. El SWAP es una especificación abierta a la industria que permite a las PCs, periféricos, teléfonos inalámbricos y otros dispositivos de gran consumo compartir y comunicar voz y datos, en y alrededor de la casa, sin la complicación y el gasto de nuevos cableados, trabaja en la banda de ISM de 2.4GHz. Con características de tiempo real, esta tecnología puede proporcionar varios canales de voz para telefonía, por lo que se ha dicho es una evolución del DECT europeo (Digital European Cordless Telephone).

HomeRF combina lo mejor tecnología de las redes de datos de banda ancha inalámbricas con la telefonía inalámbrica digital más prevaeciente estándar en el mundo.

Las prestaciones de este sistema son:

- Modulación FSK (Frequency Shift Keying).
- Velocidad de datos variables de entre 800 Kbps y 1.6Mbps.

- Utiliza la banda de 2.4 Ghz.
- 75 canales de 1 Mhz para voz.

El HomeRF2:

- Velocidad de entre 5 y 10 Mbps.
- 15 canales de 5 MHz para voz

Cabe resaltar que el estándar HomeRF posee multitud de capacidades de voz (identificador de llamadas, llamadas en espera, regreso de llamadas e intercomunicación dentro del hogar).

2.4.3.4 UWB (Ultra Wide Band)

La banda ultra-ancha (UWB) es una tecnología inalámbrica diseñada para redes de área personal (PAN) de corto alcance de tercera y cuarta generación. Con una velocidad de comunicación de 480 Mbps y con un alcance de unos 20 metros.

La banda ultra-ancha es una tecnología que permite a aplicaciones de banda muy ancha poder transferir datos de forma inalámbrica.

La modulación de banda ultra ancha se basa en la transmisión de pulsos con unos tiempos de subida y bajada extremadamente cortos (del orden de unas pocas décimas de nanosegundo).

La frecuencia de trabajo comprende desde los 3.1 GHz hasta los 10.6GHz. En lugar de requerir que una radio de tipo ultra wide band use la banda completa de 7.5 GHz para transmitir información, la FCC (Federal Communications Comisión) definió un ancho de banda de 500 MHz a un nivel de 10 db. Con estos parámetros los diseñadores son capaces de usar una combinación de sub bandas de dicho espectro para optimizar el rendimiento de los sistemas, el consumo de energía y la complejidad del diseño.

Los sistemas de tipo ultra wide band pueden realizar la transmisión de información con un bajo consumo energético intercalando el envío de datos a través de cada una de las sub bandas.

Esta tecnología se basa en la transmisión de información simultáneamente a través de múltiples portadoras espaciadas entre sí en unas frecuencias precisas.

2.5 Conclusiones

La tecnología de BWA utiliza una alta transferencia de datos permitiendo que existan varias aplicaciones para dar convergencia en la calidad de servicio, esta tecnología pretende mejorar la calidad en transmisiones de voz, datos y video.

Como se vio en el capítulo estas tecnologías cuentan con una gran variedad de modulaciones y codificaciones los cuales permiten incrementar la velocidad, haciendo un uso eficiente del espectro, aumentando su velocidad de transmisión y la capacidad de corrección de errores asegurando la integridad de la información.

Existen otras herramientas, como las antenas inteligentes y la modulación adaptativa que busca transmitir la señal en un ancho de banda reducido.

Muchas de estas tecnologías no están lo suficientemente desarrolladas, se abren constantemente foros para informar de las mejoras y tener un conocimiento mayor del funcionamiento de cada una de estas.

Se pretende que exista un momento en que las tecnologías no tengan que madurar dentro del mercado, sino que se creen las simulaciones lo suficientemente seguras para modelar estos sistemas.

Capítulo 3. El Estándar IEEE 802.16

3.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo principal describir los antecedentes los cuales han hecho de WiMax una tecnología lo suficientemente robusta, describiendo la evolución del estándar y las características que hoy se encuentran vigentes en el desarrollo de este estándar.

Como parte del objetivo de la tesis esta la de modelar la capa física del estándar, este capítulo estará enfocado hacia esta capa, mostrándonos cual es la forma de operación y descripción de los módulos que intervienen en el proceso de transmisión.

3.2 Panorama

El estándar esta diseñado desde cero para proveer acceso inalámbrico de última milla en la red de Area Metropolitana (MAN), con un desempeño comparable al que actualmente ofrecen los servicios tradicionales de cable, DSL o T1. La principal ventaja de los sistemas basados en 802.16 es que poseen la habilidad de proveer servicio rápidamente, aún en áreas difíciles de alcanzar por infraestructuras cableadas. Tienen la habilidad de superar las limitaciones físicas de las tradicionales redes de infraestructura.

La tecnología inalámbrica 802.16 provee una manera flexible en cuanto a costo y efectividad de llenar los espacios vacíos en cobertura de banda ancha, creando nuevas formas de brindar servicios de banda ancha sin los 'vicios' conocidos del mundo alámbrico.

El protocolo IEEE 802.16 establece los servicios y características soportadas mediante las especificaciones en la capa física y la capa de acceso al medio. Cuenta con mecanismos de calidad del servicio para el transporte de la información con retrasos mínimos o la mejor distribución en el ancho de banda.

El estándar IEEE 802.16 (WiMax) permite la conexión inalámbrica de banda ancha teniendo una amplia área de cobertura, para casos prácticos lo dividiremos en dos variantes el primero es para sistemas inalámbricos fijos (IEEE 802.16d) este fue establecido en el 2004 y se da como una alternativa para ser el backbone¹ para redes de distribución Wi-Fi, la segunda es el protocolo IEEE 802.16e el cual es la propuesta para sistemas de acceso a móviles.

¹ Backbone son las principales conexiones troncales en una red, es la columna vertebral de una red.

La concepción y operación de WiMax desde un inicio fue la de conseguir mayores alcances, un ancho de banda mayor, adaptado a proveer de un servicio de última milla para redes metropolitanas (MAN).

WiMax ofrece enlaces como backhaul (punto a punto)² de hasta 50Km con una capacidad de 72 Mbps para enlaces con línea de vista (LOS) y ofrece rangos de no línea de vista (NLOS) de hasta 7Km para una distribución punto multipunto.

En la actualidad este protocolo esta siendo desarrollado y promovido por el grupo WiMax Forum, la cual es una organización conformada por 250 industrias entre las que se encuentran fabricantes de chips, equipos de comunicaciones y prestadores de servicios. Su función es de vigilar la interoperabilidad entre distintos equipos que utilicen esta tecnología.

Al usar WiMax el aire como medio de transmisión, evita los gastos elevados por cableado de los sistemas actuales, esta tecnología aparece como una buena opción para atacar el mercado que se encuentra en difícil acceso o no tiene la suficiente infraestructura en el sistema de comunicación, aunado a esto presenta una adecuada calidad de servicio (QoS) que propicia una mejor transmisión para los datos, la voz y el video.

3.2.1 Características

Dentro de las características más relevantes del sistema podemos considerar las siguientes:

- Utiliza la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) esta permite la transmisión en distintas frecuencias simultáneamente. Utiliza espaciamiento ortogonal así garantizamos una interferencia mínima entre estas.
- Soporta mecanismos de antenas inteligentes los cuales mejoran la eficiencia espectral en redes inalámbricas y diversidad de antenas
- Soporta dos topologías: servicios de distribución punto multipunto y redes malla para comunicarse entre suscriptores.
- Presenta una calidad de servicio (QoS) para los operadores NLOS tal que la señal no se distorsiona severamente por la existencia de obstáculos o posibles causas de interferencia.

² Backhaul es un enlace de bajada, entre la estación base y la estación receptora

- Soporta multiplexación TDM (Multiplexación por División de Tiempo) y FDM (Multiplexación por División de Frecuencia), de esta manera permite la interoperabilidad entre distintos sistemas celulares (FDM) o inalámbricos (TDM).
- En la parte de seguridad incluye mecanismo de criptografía y seguridad propios del sistema. Agrega autenticación de instrumentos con certificados x.509³
- Posee un ajuste dinámico del tamaño del paquete de transmisión.
- Tiene aplicaciones de voz, datos y video.
- Presenta técnicas de modulación adaptativa dependiendo de las condiciones de la relación señal a ruido (SNR)
- Técnicas como FEC (Forward Error Correction), codificación convolutiva, y otros algoritmos son usados para detectar y corregir errores. La codificación que usa es adaptativa. Se incorpora ARQ (Automatic Repeat Request), para solucionar los errores que no puede solucionar.
- Algoritmos de control de potencia son implementados en las estaciones base de esta manera se puede regular la potencia en los CPE (Customer Premise Equipment), así la potencia recibida en la estación base ya este predeterminada. Con esto se logra un ahorro en la potencia consumida en los CPE's.
- Opera en bandas licenciadas en 2.4GHz y 3.5GHz para transmisiones externas en largas distancias, mientras que en bandas libres lo hace en 5.8, 8 y 10.5 GHz dependiendo del espectro libre en cada país.

3.3 Evolución del estándar IEEE 802.16

El grupo de trabajo de *IEEE 802.16* [12] ha adoptado diferentes extensiones a la tecnología básica del protocolo estas son:

802.16. La primera versión del estándar fue completada en el 2001. Considera un rango de espectro entre 10 GHz y 66 GHz. Dentro de este espectro la línea de vista era necesaria, el direccionamiento utilizaba técnicas de multiplexación ortogonal por división de frecuencia (OFDM). Consideró la prestación del servicio

³ **X.509** es un estándar UIT-T de criptografía para infraestructuras de claves públicas (Public Key Infrastructure o PKI), especifica, entre otras cosas, formatos estándar para certificados de claves públicas y un algoritmo de validación de la ruta de certificación.

con las autorizaciones correspondientes, fue diseñada para conexiones punto a punto.

802.16a. Completada en enero del 2003, su rango de frecuencia es de 2 a 11 GHz, esta dentro de las bandas licenciadas como las no licenciadas, incorpora la capacidad de no línea de vista (NLOS) y características de calidad de servicio. Da mayores capacidades a la capa de control de acceso al medio (MAC). Se incorporo un soporte para FDD y TDD proveyendo para ambas transmisión de datos duplex y halfduplex en el caso donde FDD es ocupado. Soporta protocolos como Ethernet, ATM e IP. Se pensó para conexiones fijas de última milla punto a punto y punto multipunto.

802.16c. Trabaja en el rango de de 10 a 66 GHz, se desarrolla como la evolución del funcionamiento y ensayo de los posibles perfiles, esta metodología evoluciona para definir las características que pueden ser obligatorias y las que pueden ser opcionales, con esto se aseguran los elementos para una coexistencia entre diferentes empresas.

802.16-2004(d). Recaba las principales características de los protocolos anteriores. Soporta numerosos elementos obligatorios y opcionales. Teóricamente podría transmitir en un rango superior a los 70Mbps.

Se tienen tres tipos de modulación para la capa PHY: modulación con una sola portadora, modulación con OFDM de 256 portadoras y de 2048. Aunque debido a la facilidad para el cálculo de sincronización se ha optado por OFDM de 256 portadoras.

802.16e. Se agrega soporte robusto para una banda ancha móvil. Esta basada sobre OFDM la cual soporta 2K, 1K, 512 y 128 portadoras. De esta manera ambos estándares soportan el esquema de 256 portadoras elegidos para IEEE 802.16-2004.

El sistema de OFDM permite que las señales sean divididas en muchos subcanales de baja velocidad para aumentar la resistencia a la interferencia multidireccional.

3.4 Capa Física

El modelo OSI nos define la capa física, como aquella encargada de las características eléctricas, mecánicas, funcionales y de procedimiento que se requieren para mover los bits de datos entre cada extremo del enlace de la comunicación

Sus principales funciones se pueden resumir como:

- Definir el medio o medios físicos por los cuales va a viajar la comunicación: cable de pares trenzados, coaxial, guías de onda, aire, fibra óptica entre otras.
- Definir las características materiales (componentes y conectores mecánicos) y eléctricas (niveles de tensión), ópticas que se van a usar en la transmisión de los datos por los medios físicos.
- Definir las características funcionales de la interfaz (establecimiento, mantenimiento y liberación del enlace físico).
- Transmitir el flujo de bits a través del medio.
- Manejar las señales eléctricas/electromagnéticas
- Especificar cables, conectores y componentes de interfaz con el medio de transmisión, polos en un enchufe, etc.
- Garantizar la conexión (aunque no la fiabilidad de ésta).

3.4.1 Modelo de Referencia

En nuestro caso la definición de los servicios y características soportadas por el protocolo están establecidas mediante las especificaciones correspondientes a las capas de acceso al medio (MAC) y física (PHY). En conjunto estos establecen los mecanismos necesarios para la transportación de la información.

En la Fig. 3.1 podemos observar el Modelo de Referencia el cual se divide en dos capas, la capa MAC y la capa Física.

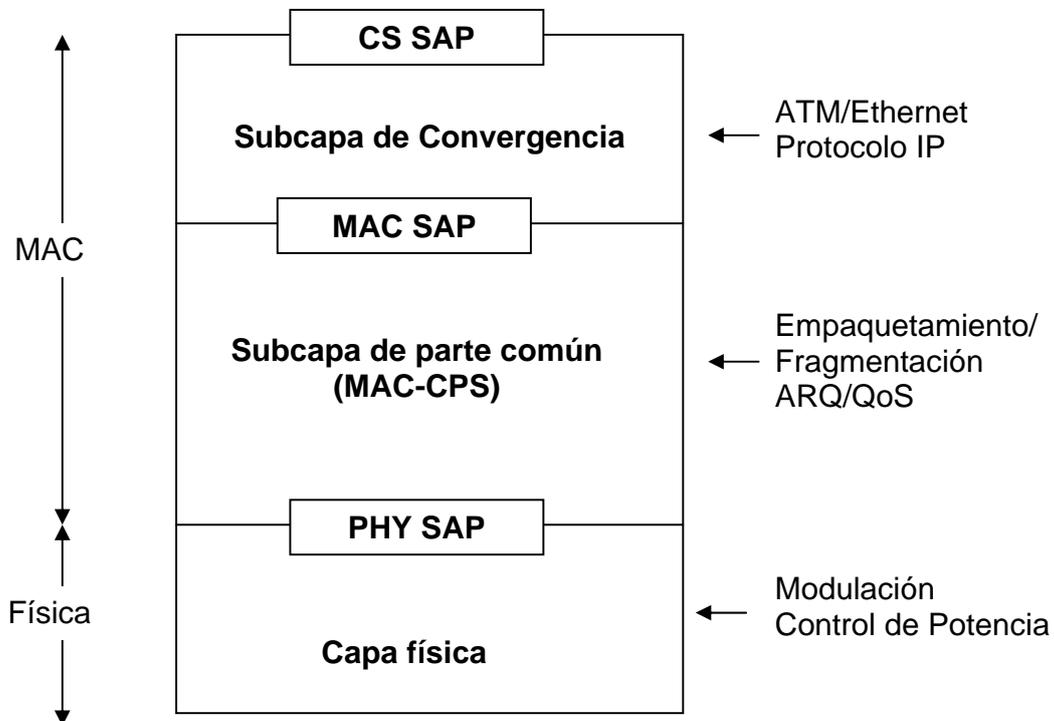


Figura 3.1 Modelo de Referencia IEEE 802.16.

En primera instancia tenemos la capa MAC la cual se subdivide en tres capas, estas son:

Subcapa de Convergencia (CS) la cual permite el mapeo o transformación de los datos provenientes de redes externas por medio del punto de acceso al servicio CS, denominado CS SAP, a unidades de servicio de datos tipo MAC (MAC-SDU'S)

Las unidades de datos de servicios (SDU) son recibidas por la subcapa de parte común (CPS) a través del punto de acceso al servicio MAC SAP. En esta capa, cada flujo SDU es clasificado y se le asocia un identificador de flujo denominado SFID y un identificador de conexión CID además a esta capa se le puede realizar la supresión del encabezado de la carga útil.

La subcapa de parte común MAC (CPS) concentran las funcionalidades de acceso al sistema, administración del ancho de banda, establecimiento de las conexiones y mantenimiento de la conexión.

La capa MAC adicionalmente contiene una capa de seguridad separada, la cual permite proveer autenticación, intercambio de llaves y cifrado.

La capa MAC intercambia información que debe ser enviada al medio físico por medio del punto de acceso físico (PHY SAP), el cual depende de la implementación en particular.

Por el otro lado esta la capa física encargada de proveer los medios físicos para mantener la comunicación, su concepción surge de la necesidad de operar los sistemas de banda ancha con la prioridad de transmitir en condiciones sin línea de vista (NLOS).

3.4.1.1. Modo de operación capa física

El flujo de datos esta formado por una secuencia de ráfagas de igual longitud. Cuando operamos con FDD (Frequency Division Duplex) las subráfagas de Uplink (UL) y Downlink (DL), son transmitidos simultáneamente y sin interferencia, gracias a la emisión en diferentes frecuencias. En el modo de TDD (Time Division Duplex) las subráfagas de DL y UL son transmitidas de manera consecutiva. Puede usarse .5, 1 ó 2 milisegundos como tiempo de ráfaga. La figura 3.2 nos muestra la secuencia de ráfagas.

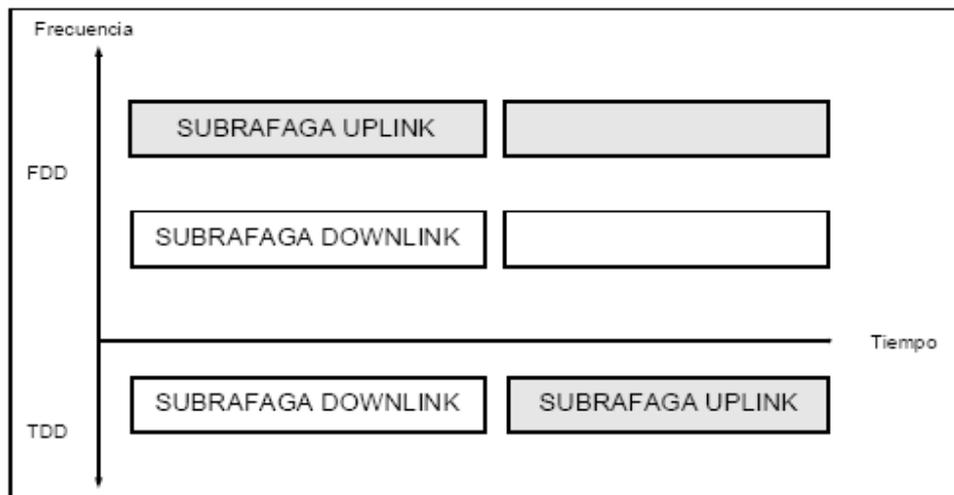


Figura 3.2 Secuencia de Ráfagas.

El estándar IEEE802.16 define tres especificaciones para la capa física, se puede usar en conjunto con la capa MAC para dar confiabilidad en la conexión extremo a extremo.

Estas son las siguientes:

- WirelessMAN-SCA: Esta especificación considera una interfaz aérea en una única portadora modulada.
- WirelessMAN-OFDM. Esta especificación utiliza un esquema de multiplexación de 256 portadoras por división de frecuencia ortogonal. Para el múltiple acceso de diferentes estaciones abonadas (SS) empleando el acceso múltiple por división de tiempo TDMA (Time Division Multiple Access).
- WirelessMAN-OFDMA. Tiene un esquema de 2048 portadoras OFDM. El acceso múltiple es proporcionado mediante la asignación de un subconjunto de portadoras para cada receptor individual.

De estas especificaciones las más adecuadas para una conexión NLOS son las dos últimas, debido a la simplicidad del proceso de ecualización para multiportadoras. Aunque por el momento se ha adoptado la utilización con 256 portadoras debido a que en el proceso de cálculo de la transformada rápida de fourier (FFT) se tiene una baja relación o tasa entre el promedio y el nivel pico, además los requerimientos para la sincronización son más sencillos.

A continuación se muestra a diagrama de bloques el esquema de transmisión, el cual esta descrito en la figura 3.3

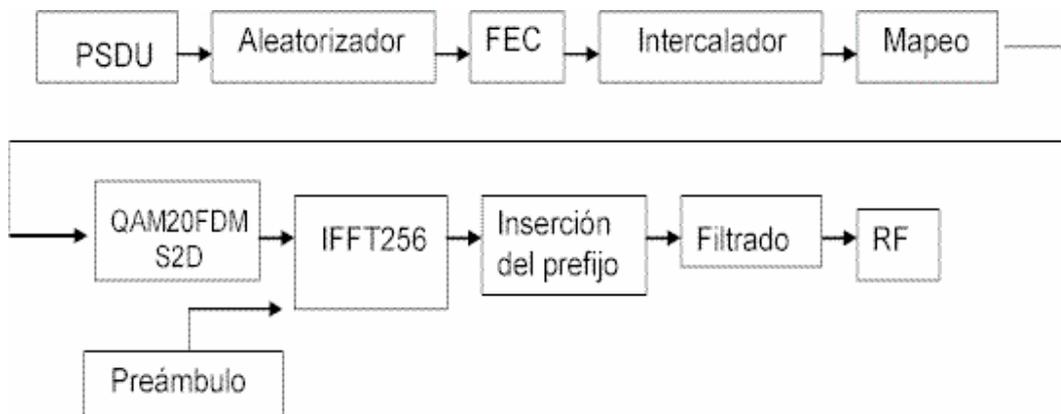


Figura 3.3 Diagrama de Bloques del esquema de transmisión.

El procesamiento se compone de:

- a. Bloque aleatorizador permite distribuir la energía de los datos sobre el espectro disponible.
- b. Bloque FEC para la corrección de errores, se compone de un bloque de codificación Reed- Solomon el cual se concatena con un código convolucional.
- c. Bloque intercalador para suministrar diversidad temporal y minimizar el efecto de las ráfagas de error sin agregar encabezado extra.
- d. Un bloque para mapear los datos de información a los símbolos del esquema de modulación utilizado.
- e. Un bloque para mapear los símbolos dependientes del esquema de modulación a los símbolos OFDM.
- f. Un bloque para la transformación del símbolo OFDM del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.
- g. Bloque para insertar el prefijo cíclico requerido para optimizar la transmisión en un ambiente multitrayecto.
- h. Bloque para realizar la conformación de la señal.
- i. Bloque para acondicionar la señal para su radiación.

Existen dos aspectos que integra WiMax estos son:

- La capacidad de adaptar el esquema de modulación a las condiciones del canal.
- La capacidad de corrección de errores logrado a través de la concatenación del código de bloque Reed Solomon.

3.4.2 Elementos de la capa física

Los diseñadores (IEEE 802.16d han diseñado un sistema para que en su máxima capacidad se ofrezca una confiabilidad del 99.999%. El nivel físico incluye OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), Time Division Duplex (TDD), Frequency Division Duplex (FDD), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) y Quadrature Amplitude Modulation (QAM). Los tipos de modulación (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM), donde BPSK es el método menos eficiente, y se emplea cuando las estaciones suscriptoras o SS's están más alejadas de las estaciones base o

BS, y por lo tanto se requiere mayor potencia para realizar la transmisión. Por otro lado, se utiliza 64QAM, donde las SS están relativamente cerca de la BS, y se requiere menos potencia para la transmisión. En el gráfico 3.4 se muestra el tipo de modulación utilizado en términos del alejamiento a la estación base.

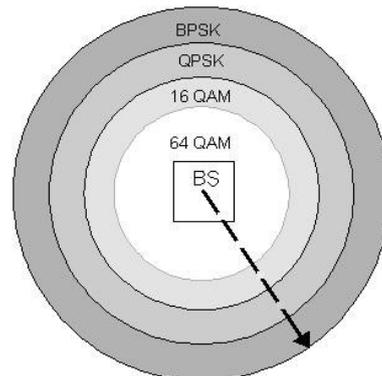


Figura 3.4. Modulación dependiendo de la distancia entre la BB y la SS.

Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM).

La modulación OFDM presenta muchos beneficios que no presentan otras modulaciones previas a esta, permite la transmisión eficientemente en pequeños anchos de banda.

Esta modulación se caracteriza por dividir la señal de banda ancha en un número de señales de banda reducida. La OFDM es un caso especial de la modulación multiportadora (MCM), en donde múltiples datos son transmitidos de manera paralela utilizando diferentes sub portadoras con banda de frecuencias traslapadas ortogonalmente.

Las subportadoras son datos modulados usando:

BPSK (BiPhase Shift Keying). Es una forma de desplazamiento de fase, en la cual dos bits se modulan inmediatamente, seleccionando uno de cuatro grados posibles de los desplazamientos de fase del portador 0, 90, 180, 270 grados.

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Es una forma de modulación en la, la señal se envía en cuatro fases, 45, 135, 225, y 315 grados, y el cambio de fase de un símbolo al siguiente codifica dos bits por símbolo. Una de sus principales ventajas es ofrecer la misma eficiencia de potencia, utilizando la mitad de ancho de banda.

16-QAM.- Es una modulación digital en la que se tienen 4 fases y 4 amplitudes, de esta manera es como se tiene 16 símbolos.

64-QAM.- Al igual que la 16-QAM, esta es una modulación digital en la que se tienen 4 fases y en este caso 16 amplitudes, contiene 64 símbolos.

En la respuesta espectral máxima de cada sub portadora el resto de respuestas espectrales de subportadoras son idénticamente cero. Después de la modulación de datos los símbolos son alimentados a través de un proceso de conversión paralelo serie. A cada símbolo PSK o QAM es asignado una subportadora y una implementación DFT(discrete Fourier transform) inverso (IDFT) para generar una señal de dominio en el tiempo.

Sin embargo, si la extensión del retraso es mayor que la duración de los símbolos, la multidireccionalidad puede afectar el funcionamiento. Un tiempo de guarda es introducido para eliminar la interferencia íter simbólica (ISI) causada por la extensión de retraso. Como regla, el tiempo de guarda es 2 a 4 veces mayor que la extensión de retraso esperada.

Para reducir la interferencia entre portadoras, los símbolos de OFDM son cíclicamente extendidos en un intervalo de guarda. Como el retardo es menor que el tiempo de guarda, este ciclo extendido asegura que un símbolo OFDM pueda tener un número entero de ciclos en el intervalo DFT.

Una característica del OFDM, es el superar los problemas de propagación los cuales se presentan en el NLOS. Las señales OFDM tienen la ventaja de ser capaces de operar con retardos de la propagación en los entornos NLOS. Además de tener la capacidad de poder operar con un retardo de ensanchamiento más grande en el ambiente NLOS. Una ventaja muy importante es que es más sencillo modular señales portadoras individuales OFDM que modular una simple portadora ensanchada.

Los tipos de modulación permitidos para Uplink y Downlink son: BPSK, QPSK, QAM y 64-QAM.

Además se conocen los preámbulos usados por el protocolo IEEE 802.16d, esto ayuda al receptor en la estimación del canal y la sincronización. En el Downlink se tiene un largo preámbulo de dos símbolos OFDM, estos son enviados al inicio de cada frame. En el Uplink un corto preámbulo de un símbolo OFDM es enviado por el SS al inicio de cada frame.

Este estándar IEEE 802.16d presenta siete combinaciones de modulación y rangos de codificación que son usados para alcanzar varios niveles en la tasa de

datos y en la robustez de la transmisión, dependiendo de las condiciones del canal y de la interferencia.

Utiliza un bloque de código concatenado Reed-Solomon (RS) externo, con un código convolucional interno. El código RS externo esta fijado por medio de un RS sistemático (N = 255, K =239, T = 8). El código convolucional interno, tiene una longitud de 7, y un rango entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$. Esta interpolación también se utiliza para reducir el efecto de ráfaga de error.

En la tabla 3.1 se presenta la velocidad máxima de transmisión dependiendo del tipo codificación y modulación.

Tipo de ID	Tipo de Modulación	Codificación	Información bits/símbolo	Información de bits/símbolo OFDM	Tasa pico de dato 5MHz (Mb/s)
0	BPSK	$\frac{1}{2}$.5	88	1.89
1	QPSK	$\frac{1}{2}$	1	184	3.95
2	QPSK	$\frac{3}{4}$	1.5	280	6
3	16QAM	$\frac{1}{2}$	2	376	9.06
4	16QAM	$\frac{3}{4}$	3	568	12.18
5	64QAM	$\frac{2}{3}$	4	760	16.3
6	64QAM	$\frac{3}{4}$	4.5	856	19.36

Tabla 3.1. Capacidad del Canal.

Código Concatenado Reed Solomon (RS). El RS es un código FEC, cuyo proceso de codificación es similar a todos los códigos de bloque, consistiendo en una operación la cual agrega un grupo de bits conocidos a un grupo de bits del mensaje que se va a transmitir.

La relación entre bits agregados y bits de mensaje es conocida por el receptor y por lo tanto puede decodificarla. Pueden existir diversas técnicas o formas de relación entre ambos grupos, en el código RS, corresponde a una operación de paridad.

El código RS, y en general los códigos bloque, se definen como códigos sistemáticos, esto para indicar que el mensaje no es alterado por la adición de bits redundantes, ya que la posición de los bits agregados al mensaje está siempre bien definida, de acuerdo a los polinomios correctores de error previamente establecidos. Así no es necesario incluir los bits de paridad calculados en el codificador RS dentro del mensaje, siendo agregados sólo al final de la trama.

La entrada al codificador RS es una trama de k bytes de mensaje (aleatorizados en el randomizer) y su salida es una trama de n bytes, donde n es mayor que k , donde $n-k =$ número de bytes de paridad agregados.

El código RS se anota $RS(n,k,t)$ o simplemente $RS(n,k)$, donde $t = (n-k)/2$ indica el máximo número de bytes erróneos que se pueden corregir.

Códigos Convolucionales: es una técnica de codificación para control de errores que genera una secuencia codificada de bits a partir de una secuencia de entrada de bits de información.

La secuencia codificada de salida se genera a partir de cada bit de la secuencia de entrada y no de bloques como en el caso de códigos RS. La salida del codificador, además de depender del bit actual de entrada, depende de los bits de entrada anteriores, en un proceso continuo con redundancia.

El codificador tiene memorias internas para recordar los bits de entradas anteriores. A mayor cantidad de memorias, mayor posibilidad de disminuir el error, con la desventaja de adquirir mayor redundancia. Se genera mayor retardo producto de la complejidad de los cálculos que agrega cada registro.

En un codificador convolucional práctico, la secuencia de entrada es dividida en segmentos de k bits estos se aplican simultáneamente a la entrada del codificador. Por cada segmento de entrada de k elementos, el codificador genera un segmento de salida de n elementos, donde n es mayor que k .

Códigos de bloque tiempo espacio. STBCs (space- time block code) es una característica opcional que se implementa en los downlinks incrementando la diversidad. La aplicación de los códigos STBC Alamouti 2x1 o 2x2, no afectan el ancho de banda, así se proporciona diversidad en el tiempo.

Una característica opcional del sistema es la codificación Turbo, la cual aumenta la cobertura, a un costo de aumentar la latencia de decodificación y su complejidad.

Sistema de antena adaptiva.- Este protocolo presenta ciertas características que permiten el uso de sistemas con antenas inteligentes. En una comunicación punto a punto para la transmisión de uplink y downlink, se define una conexión entre la estación base (BS) y estación subscriptora (SS), y se le proporciona al SS un canal de realimentación a la BS. Los componentes reales e imaginarios del canal de respuesta para cada uno de las ráfagas directas y subportadoras específicas provistos por la BS. La BS puede especificar la resolución en frecuencia dominante para esta realimentación.

Estas antenas se están utilizando para aumentar la densidad espectral (es decir, la cantidad de bits que pueden comunicarse sobre un determinado canal en un determinado momento) y la relación señal-ruido para soluciones Wi-Fi y WiMAX. Debido al desempeño y a la tecnología, el estándar 802.16-2004 soporta varios tipos de antenas inteligentes adaptables, tales como:

- Antenas receptoras de diversidad espacial. Implica más de una antena receptora de la señal. Las antenas deben colocarse separadas a por lo menos media longitud de onda para funcionar correctamente. La longitud de onda puede derivarse tomando la frecuencia inversa. Por ejemplo, para una portadora de 2.5 GHz, la longitud de onda sería 0,13 metros ó 5,1 pulgadas. Para una portadora de 5.8 GHz, la longitud de onda sería 0,05 metros ó 1,9 pulgadas. Al considerar la mitad de la longitud de onda para las frecuencias de interés, estamos tomando de una a dos pulgadas y media. Al mantener esta distancia mínima se asegura que las antenas sean incoherentes, es decir, serán impactadas de diferente forma por los efectos aditivos/sustractivos de las señales que llegan por medio de múltiples trayectorias.
- Antenas de diversidad simple. Detectan la fuerza de la señal de antenas múltiples (dos o más) juntas y convierten la antena en receptora. Cuanto más incoherentes sean las antenas elegibles, mayor será la probabilidad de conseguir una señal fuerte.
- Antenas orientadoras de haces. Forman el diagrama de la red de antenas para producir grandes amplificaciones en la dirección de la señal útil o

lengüetas que rechazan la interferencia. Las Antenas de Alta Ganancia aumentan la señal, el ruido y la velocidad. El diagrama direccional atenúa la interferencia del haz principal. Se puede disminuir el desvanecimiento selectivo si los componentes multitrayectoria llegan con suficiente separación angular.

- Antenas formadoras de haces. El área alrededor de una estación base se divide en sectores para tener rechazo adicional de frecuencia entre los sectores. La cantidad de sectores puede variar desde 4 hasta 24. Por mucho tiempo se han utilizado estaciones base que administran sectores inteligentemente en estaciones base de servicios móviles.

3.5 Conclusiones.

Como se vio en el capítulo, WiMax es una tecnología que surge desde cero, con la misión de cubrir las necesidades en la calidad de servicio para datos, voz y video en tiempo real.

Se observó que en su comienzo esta tecnología solo permitía enlaces punto a punto, sin embargo con las regulaciones y el fomento a la investigación WiMax creció pudiendo entablar conexiones punto multipunto, con esto abrió una nueva opción para el mercado de empresas y hogar.

En la actualidad su función no se limita a ser un backbone, sino que tiene las características suficientes y necesarias para soportar una arquitectura de backhaul.

Su gran crecimiento y la introducción de esquemas de modulación como lo es OFDM y sus características para el control de errores hacen de WiMax un sistema costeable, para proveer servicios bastante confiables cumpliendo con las más altas normas de transmisión.

Capítulo 4. Diseño del modelo de simulación.

4.1 Resumen

En este capítulo se presenta el modelo de simulación creado el cual simula parte de la capa física del modelo WiMax. Su función primordial es computar los bits erróneos que se generan desde la estación base hasta la estación suscriptora por un canal con ruido gaussiano, de modo se pueda evaluar experimentalmente el Bit Error Rate, para esta labor fue necesario usar los bloques de Simulink en Matlab.

Se ha agregado la programación adecuada para poder hacer un modelo lo suficientemente robusto. De un modo sencillo se pueden variar los parámetros para poder establecer distintos escenarios, dentro de las variables más importantes con los que se cuenta están: el tipo de modulación la cual puede ser QPSK, BPSK o 16QAM, la estructura en los polinomios convolucionales su codificación puede ser $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ entre otras, la detección de los bits ya sea de manera fuerte o suave, la relación señal a ruido por bit o por símbolo, el periodo de transmisión, así como un módulo para el canal de ruido en este podemos variar la potencia de la señal y su distribución.

4.2 Diagrama de Bloques

En el capítulo anterior se hizo referencia al modelo de comunicaciones del estándar WiMax, el cual es usado en sus versiones más recientes. En nuestro caso nos servirá como guía de referencia. Debido a la importancia de este se decidió mostrarlo nuevamente en la figura 4.1, para poder hacer las comparaciones entre nuestro modelo y el del estándar.

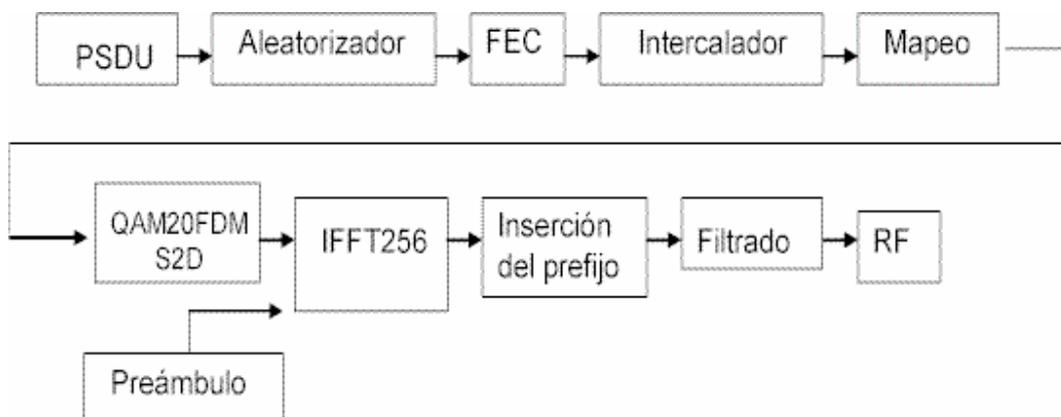


Figura 4.1. Sistema de comunicación con modulación OFDM.

A continuación en la figura 4.2 se muestra el modelo, el cual tiene la función de transmitir varios frames de información a través del canal de ruido aditivo gaussiano, con la intención de corregir los errores mediante códigos convolucionales.

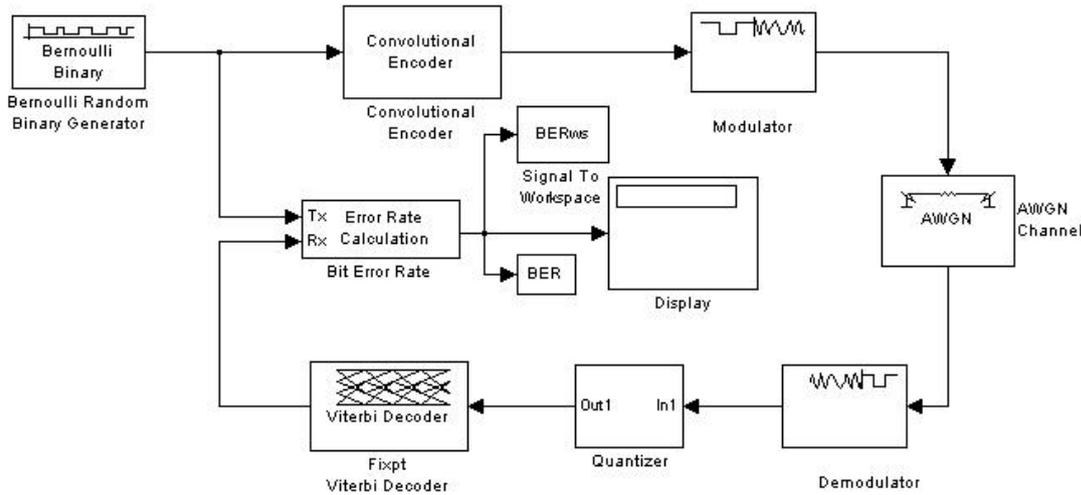


Figura 4.2. Modelo Parcial de la Capa Física de WiMax en Matlab.

Como podemos observar en nuestro modelo se tiene un Generador Binario el cual funciona como el bloque PSDU (Physical layer Service Data Unit), éste simula los paquetes de datos que son enviados desde la capa MAC. Por otro lado está el bloque aleatorizador el cual se encargada de distribuir la energía de los datos sobre el espectro disponible el cual no fue integrado al modelo debido a las limitantes establecidas. Después se cuenta con el bloque FEC de WiMAX éste es una composición de dos códigos el Reed Solomon concatenado con un código convolucional, para nuestro caso se ha puesto especial énfasis en los códigos convolucionales pudiendo alterar de manera sencilla el número de registros.

El siguiente bloque de WiMax es un intercalador que tiene la función de intercalar los bits de diferentes tramas para enviarlo como si fuera un solo paquete, con esto se busca minimizar el efecto de ráfagas de error.

A continuación están dos bloques estos son el mapeador y el QAM OFDM, nosotros sólo estamos trabajando con una portadora a la vez, nuestro bloque se llama modulador.

Se agregan otros bloques de sincronización los cuales están contemplados dentro de cada uno de los bloques y con mayor hincapié cuando se hace el cálculo de los bits erróneos, ya que debe existir una referencia para el cómputo de las señales.

Por último el bloque de RF el cual está acondicionado para enviar la información por medio de radiación y propagarlo a través del canal aéreo, una alternativa es simular exclusivamente el ruido que se le puede agregar al canal mediante el bloque AWGN channel (canal con ruido aditivo gaussiano).

Se ha complementado con el proceso inverso de la transmisión, este debe recibir toda la información enviada, tiene un bloque de demodulación el cual se encarga de regresar la información a sus respectivos niveles de energía según halla quedado cuando se le agrego ruido. El bloque de cuantización que se encargará de distribuir la señal recibida en un número finito de valores para después ser procesados por el bloque de decodificación de Viterbi.

Por último el bloque para el cálculo de error, este tiene la función de comparar la señal la cual fue transmitida al inicio con la señal que se ha recibido después de haber pasado por el canal con ruido gaussiano. De manera que si existe diferencia entre el bit en un momento preciso entonces se considera ese bit como erróneo.

4.3 Descripción de cada uno de los módulos.

4.3.1 Bloque Generador Binario con distribución Bernoulli

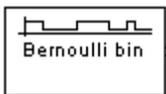


Figura 4.3
Bloque
Generador
Binario.

La distribución de Bernoulli la cual es representada en la figura 4.3 tiene una distribución de probabilidad discreta, el cual toma el valor de 1 para la probabilidad de éxito p y valor 0 para la probabilidad de fracaso $q = 1 - p$. Por lo tanto, si X es una variable aleatoria con distribución binaria tenemos:

$$\Pr(X = 1) = 1 - \Pr(X = 0) = p \tag{Ec. 4.1}$$

Su función de probabilidad viene definida por:

$$f(k; p) = \begin{cases} p & \text{si } k = 1 \\ 1 - p & \text{si } k = 0 \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \tag{Ec. 4.2}$$

Cuadro de configuración

Las características de nuestro sistema que son modificables se muestran en la figura 4.4

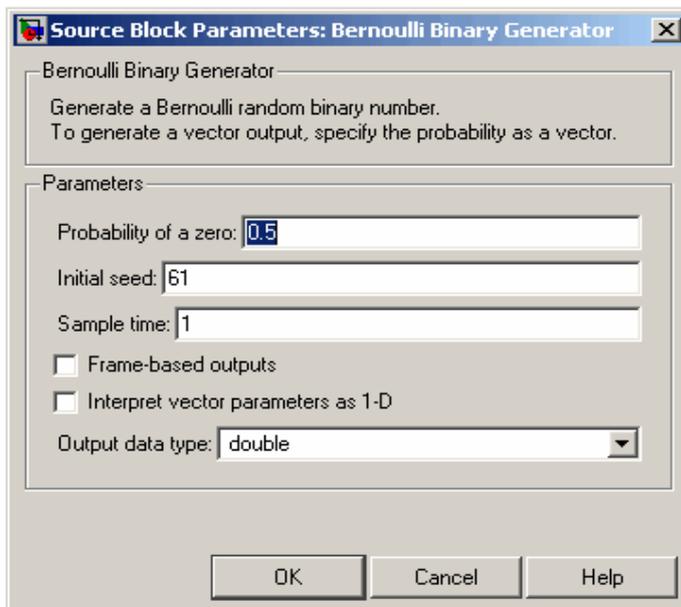


Figura 4.4 Cuadro de configuración del Generador de Bernoulli.

Descripción de las opciones

- **Probability of a zero (Probabilidad de cero)**
Es la probabilidad de que ocurra un cero
- **Initial seed (Semilla inicial)**
Es el valor inicial para generar números aleatorios
- **Sample time (Tiempo de muestreo)**
Se establece el periodo con el cual se van a tomar las muestras.
- **Frame-based outputs (Salidas basadas en una estructura)**
Al activar la casilla, podremos enviar los bits como un paquete de datos, en caso de que no este activada se enviará bit por bit.
- **Samples per frame (Muestreo por estructura)**
En este apartado establecemos la cantidad de bits que contendrá nuestro paquete.

- **Output data type (Tipo de salida de datos)**

A la salida del generador se le da un formato a los bits generados, estos pueden ser ya sea enteros, dobles o booleanos.

4.3.2 Encoder Convolutional (Codificador Convolutacional)

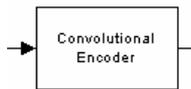


Figura 4.5
Codificador
Convolutacional

La figura 4.5 representa al codificador convolutacional este se basa en registros de desplazamiento conectados con sumadores base 2 en los que se realiza la codificación. Por cada bit que entre en el codificador se obtienen n bits.

Por ejemplo, el codificador de la figura 4.6 con tasa de transferencia de 2/3, es decir se introducen dos cadenas de bits, los cuales consecutivamente llenaran cada uno de los registros, en el tiempo igual a 4 se tendrán todos los registros llenos, y se hará la suma en código 2.

Matlab genera estos registros mediante un polinomio el cual se representa en su valor octal.

Por ejemplo la función que describe al código convolutacional: `poly2trellis([5 4],[23 35 0;0 5 13])`

Donde: [5 4] representa los registros menos uno, para cada entrada.

La siguiente parte [23 35 0; 0 5 13] se integra por el polinomio que describe a los registros, estos valores se da en forma octal

Transformando estos valores a binario tenemos: [10011 11101 0 ; 0 0101 1011].

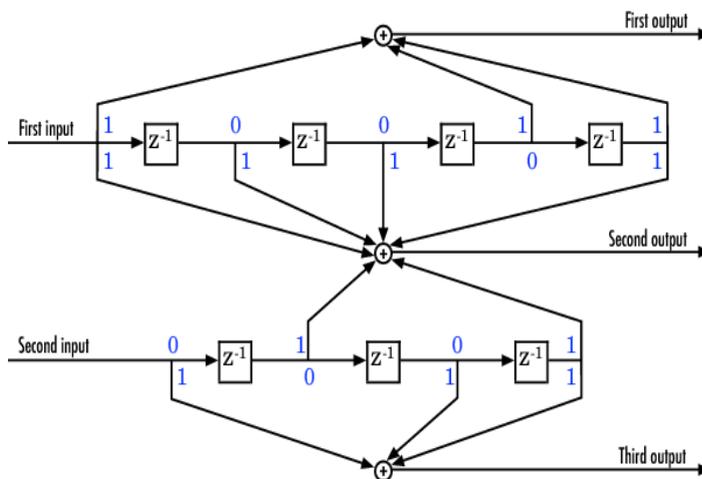


Figura 4.6 Modelo de un codificador convolutacional 2/3.

Así podemos modificar la tasa de transferencia incrementando las salidas, hemos de recordar que WiMax trabaja con C.C. con tasas de $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ y $\frac{2}{3}$.

Cuadro de configuración

En este caso será suficiente poner el polinomio tal como se explicó anteriormente.

4.3.3 Modulator (Modulador)

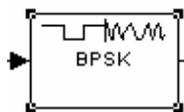


Figura 4.7
Bloque Modulador.

La figura 4.7 es el módulo modulador el cual contempla la modulación BPSK, QPSK y 16QAM aunque el número de símbolos puede ser modificado.

Este bloque es el encargado de la modulación, recordando que la modulación es el proceso de colocar la información contenida en una señal, generalmente de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia.

Debido a este proceso la señal de alta frecuencia denominada portadora, sufrirá la modificación de algunos de sus parámetros, siendo dicha modificación proporcional a la amplitud de la señal de baja frecuencia denominada moduladora.

A continuación se describe el funcionamiento de cada uno de estas modulaciones.

Modulación PSK (Phase shift keying), es una modulación de fase donde la señal moduladora (datos) es digital.

Existen dos alternativas de modulación PSK: PSK convencional, donde se tienen en cuenta los desplazamientos de fase y PSK diferencial, en la cual se consideran las transiciones.

En la figura 4.8 se ejemplifica como se modula en BPSK

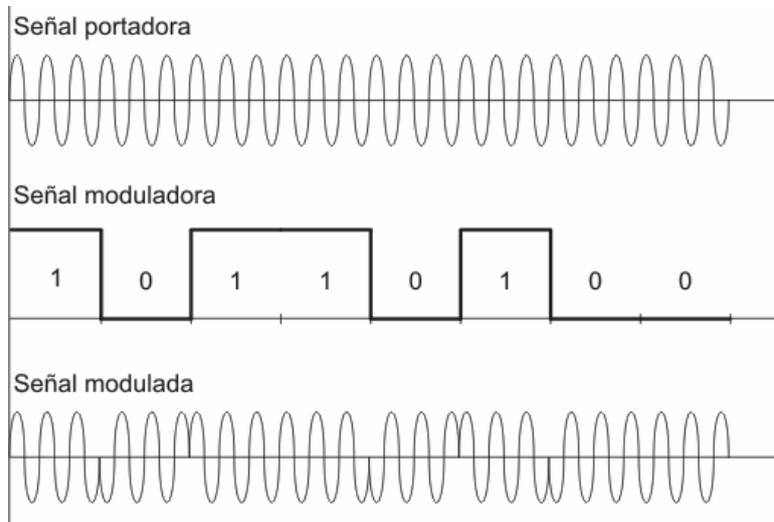


Fig 4.8 Ejemplo de modulación BPSK.

Las consideraciones que siguen a continuación son válidas para ambos casos.

En PSK el valor de la señal moduladora está dado por

$$v_m(t) = v_m(t) = \begin{cases} 1 & \text{para un "1" binario} \\ -1 & \text{para un "0" binario} \end{cases} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Mientras que la señal portadora vale:

$$v_p(t) = V_p \cos(2\pi f_p t) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

En donde V_p es el valor pico de la señal portadora y f_p es la frecuencia de la señal portadora.

La modulación PSK está caracterizada por

$$v(t) = v_p(t) \cdot v_m(t) \rightarrow v(t) = V_p \cdot V_m \cos(2\pi f_p t) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Para nuestro caso, empleamos $V_m = 1$

$$\text{con lo esto tenemos: } v(t) = V_p \cos(2\pi f_p t) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$\text{y } V_m = -1: v(t) = -V_p \cos(2\pi f_p t) = V_p \cos(2\pi f_p t + \pi) \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Observando las expresiones (4.6) y (4.7) vemos que éstas se diferencian entre sí en una fase de 180° , a lo cual se le denomina BPSK y se muestra en la figura 4.9.

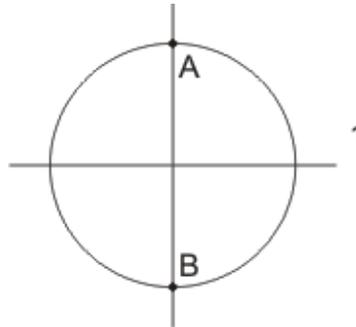


Figura 4.9 Esquema para BPSK.

Modulación QPSK (Quadrature Phase Keying)

Las señales con una diferencia de fase de 180° proveen un nivel de desempeño alto en comunicaciones. Para este caso las señales son de la forma $\pm A\cos(2\pi ft)$. Ya que las señales seno y coseno son ortogonales (la integral de su producto es igual a cero) es posible separarlas completamente en el receptor, usando técnicas de detección coherentes. Por lo tanto es posible enviar dos señales PSK simultáneamente sin un incremento en el ancho de banda. La señal transmitida tiene una de 4 posibles formas:

$$\pm(\cos(2\pi ft)\pm\sin(2\pi ft)) \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Usando propiedades trigonométricas, los términos en el paréntesis pueden ser escritos como:

$$\cos(2\pi ft)\pm\sin(2\pi ft)=\sqrt{2}\cos\left(2\pi ft\pm\frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Tal que las cuatro señales posibles pueden ser escritas como:

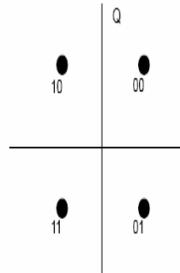
$$\sqrt{2}\cos\left(2\pi ft+\frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{Ec. 4.10})$$

$$\sqrt{2}\cos\left(2\pi ft+\frac{3\pi}{4}\right) \quad (\text{Ec. 4.11})$$

$$\sqrt{2}\cos\left(2\pi ft+\frac{5\pi}{4}\right) \quad (\text{Ec. 4.12})$$

$$\sqrt{2} \cos\left(2\pi ft + \frac{7\pi}{4}\right) \tag{Ec. 4.13}$$

La figura 4.10 muestra la constelación de QPSK:



El símbolo de modulación $S(k)$ debe ser $I + jQ$. En la tabla 4.1 se muestran los bits y las coordenadas que representa.

Figura 10 Constelación QPSK.

B(1)	B(2)	I	Q
0	0	1	1
0	1	1	-1
1	0	-1	1
1	1	-1	-1

Tabla 4.1. Representación de los bits en QPSK.

Por lo tanto la transmisión simultánea de señales PSK ortogonales es lo mismo que PSK con 4 posibles ángulos, esto se conoce como QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*).

Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

Esta modulación consiste en modular dos portadoras que están desfasadas entre si en 90°, se modula en amplitud después estas señales se suman y generan códigos que son dependientes tanto de la amplitud como de la fase. En nuestro caso usamos 16QAM con símbolos generados con código gray. En la figura 4.11 se muestra la constelación para 16QAM.

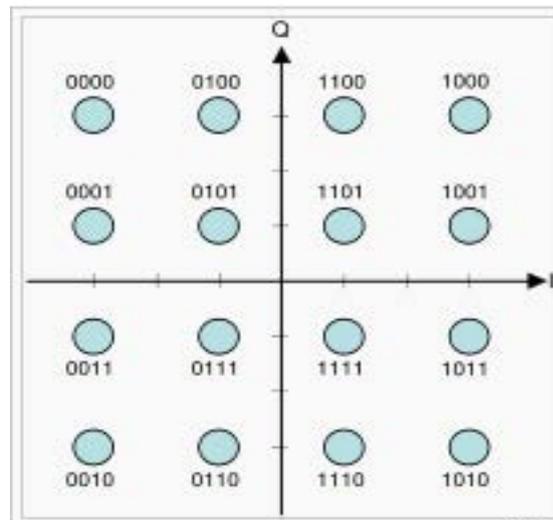


Figura 4.11 Constelación 16QAM.

La representación de cada combinación de los 4 *bits* se presenta en la tabla 4.2.

B(1)	B(2)	B(3)	B(4)	I	Q
0	1	0	1	3	3
0	1	0	0	3	1
0	1	1	0	3	-1
0	1	1	1	3	-3
0	0	0	1	1	3
0	0	0	0	1	1
0	0	1	0	1	-1
0	0	1	1	1	-3
1	0	0	1	-1	3
1	0	0	0	-1	1
1	0	1	0	-1	-1
1	0	1	1	-1	-3
1	1	0	1	-3	3
1	1	0	0	-3	1
1	1	1	0	-3	-1
1	1	1	1	-3	-3

Tabla 4.2. Representación de los bits en 16QAM.

Cuadro de Configuración

En la figura 4.12 se muestra al bloque de configuración en dado caso que se trabaje con MPSK se tiene:

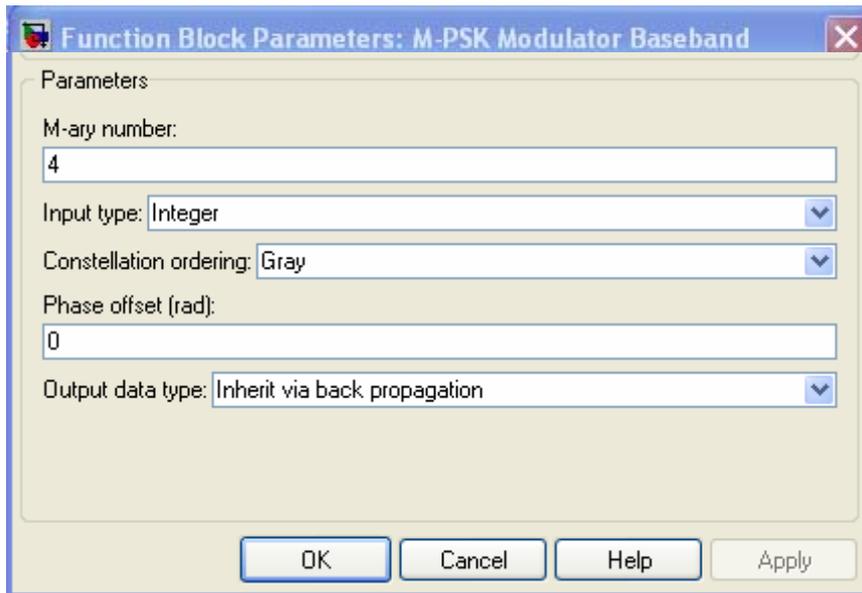


Figura 4.12 Cuadro configuración modulación MPSK.

Para la opción de una modulación MQAM tenemos el siguiente bloque de configuración QAM en cual se muestra en la figura 4.13.

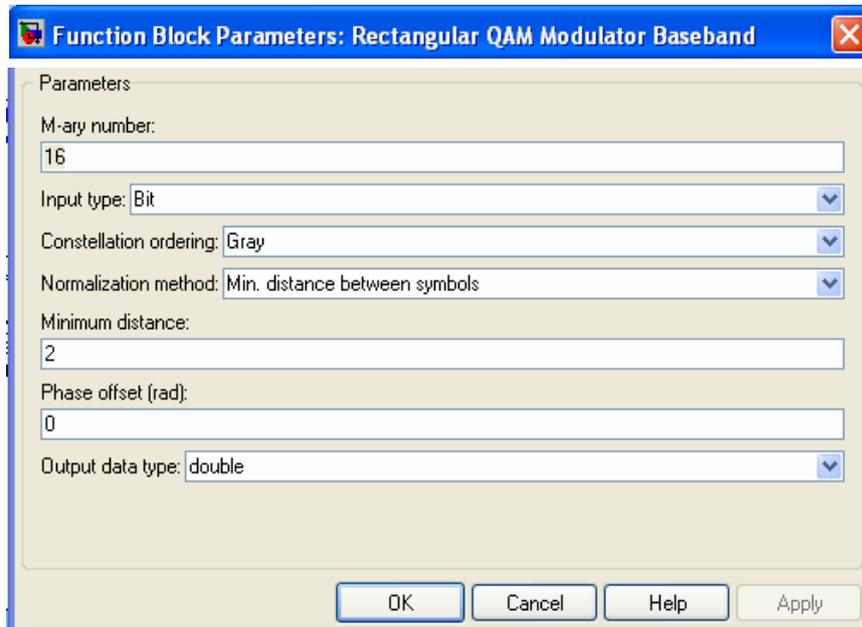


Figura 4.13 Cuadro configuración modulación MQAM.

Descripción de las opciones

- **M-ary number (Número M-ario)**
Nos permite variar el número de estados de la modulación.
- **Input type (Tipo de entrada)**
Determinamos el tipo de variable que entrará a nuestro sistema. Para nuestro caso trabajaremos con números booleanos
- **Constellation Order (Orden de la constelación)**
Nos permite modificar la configuración de las constelaciones, es decir los símbolos que estarán representados en cada estado. Como se menciono anteriormente usaremos código gray debido a su facilidad, y a otros aspectos relacionados con el ruido y la identificación de cada uno de estos.
- **Minium Distance (Distancia mínima)**
Podemos variar la distancia a la que se encuentra cada uno de nuestros estados, estos deben tener la misma distancia.
- **Out Data Type (Tipo de dato a la salida)**

Nos permite entregar distintas representaciones de nuestros símbolos o bits. Por facilidad siempre buscaremos la opción para representarlo como bits.

4.3.4 Bloque AWGN Channel (Canal Aditivo con Ruido Gaussiano)

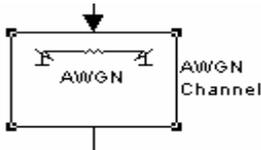


Figura. 4.14
Canal Gaussiano.

En la figura 4.14, se representa el canal gaussiano, este tiene las siguientes características.

- Tiempo discreto.
- No tiene memoria.
- Posee ruido aditivo gaussiano.
- El ancho de banda y de potencia están limitados

En general el ruido gaussiano se caracteriza por tener un espectro de energía constante para todas las frecuencias. Cuando se presenta este problema, el valor exacto de cualquier señal es diferente cada vez que se captura la misma.

Cuadro de configuración

La figura 4.15 nos muestra los parámetros en un canal blanco con ruido gaussiano.

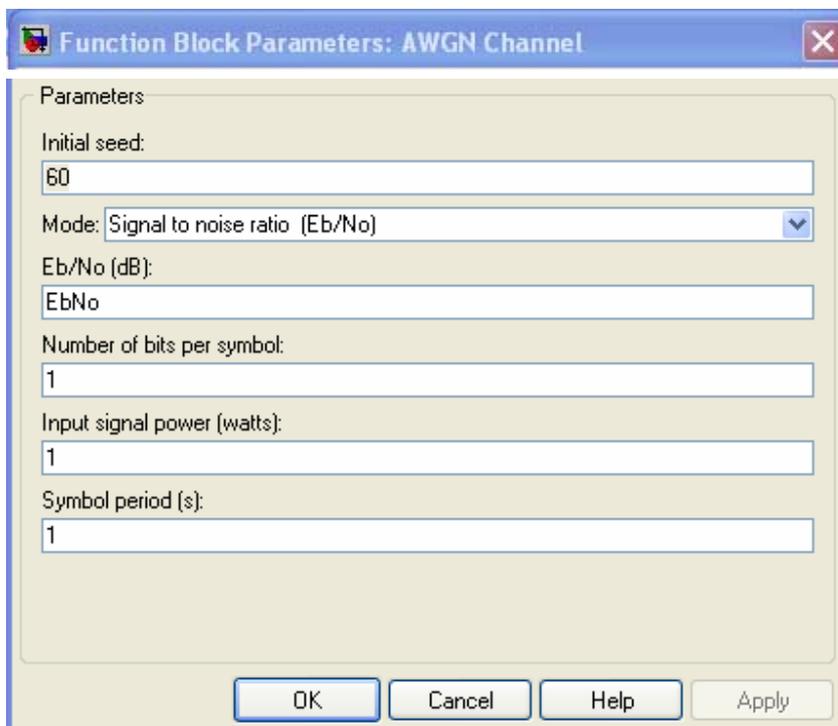


Figura 4.15 Cuadro de configuración del canal AWGN.

Descripción de las opciones

- **Initial Seed (Semilla inicial)**

Indica la cantidad de semillas con las que se iniciara el canal

- **Mode (Modo)**

Se han considerado diferentes distribuciones dependiendo de:

- Eb/No Es la relación de energía por bit a densidad espectral de ruido y está dada en Watts por Hertz.
- Es/No Es la relación de energía por símbolos a densidad espectral de ruido
- SNR En base a la relación que existe entre la potencia de la señal y el canal de ruido

Debido a que el ruido puede cambiar drásticamente dependiendo de estos valores, hemos decido estandarizar la varianza con respecto al periodo de muestreo. La ecuación 4.8 representa una de las sugerencias por el grupo de Matlab al trabajar con el canal gaussiano.

$$NoiseVariance = \frac{SignalPower \times SymbolPeriod}{SampleTime \times 10^{\frac{Es/No}{10}}} \quad (Ec. 4.8)$$

- **Number of bits per symbol (Número de bits por símbolo)**

Se configura el número de bits que existe en cada símbolo. La opción solo se activa si Eb/No está seleccionado

- **Input signal power (watts) (Potencia de la señal a la entrada)**

Es la potencia media de la señal que hemos enviado al comienzo

- **Symbol period (Periodo del símbolo)**

Es el periodo que dura un símbolo, que depende directamente del tipo de modulación

- **Variance (Varianza)**

Es la varianza del ruido gaussiano. Aparece cuando se de la opción de mask.

4.3.5 Demoludator (Demodulador)



La figura 4.16 muestra el bloque demodulador el cual se encarga de recuperar la señal de datos de una señal modulada, la portadora es desechada.

Figura 4.16 Demodulador.

Cuadro de configuración

En la figura 4.17 se muestran los parámetros que se pueden modificar.

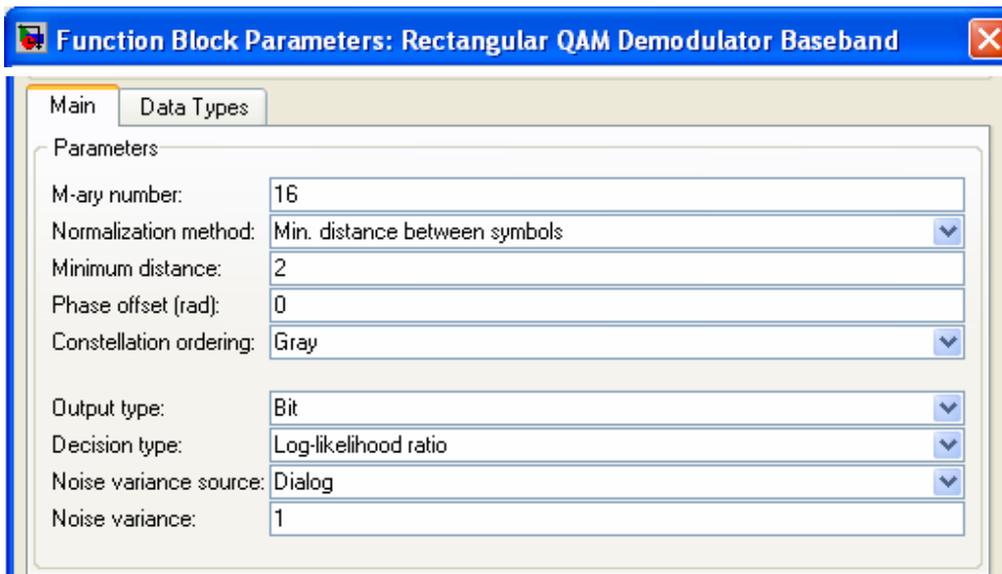


Figura 4.17 Cuadro de configuración para la modulación.

Descripción de las opciones

- **M-ary number (Número M-ario)**

Es el número de puntos en la constelación. Estos deben ser 2^k donde k es el número de bits y que estarán representados por una palabra.

- **Normalization method (Método de normalización)**
Es el método de normalización que se usara para la distribución de los puntos, en nuestro caso será de mínima distancia.
- **Minium distance (Distancia mínima)**
Es la distancia que existe entre un punto y otro adyacente o que se encuentre a un lado.
- **Contallation Order (Orden de la constelación)**
Es la distribución de los puntos con referencia a sus símbolos generados. La opción para nosotros es código Gray.
- **Out put type (Tipo de salida)**
Es el tipo de datos que se generaran para entrar en el siguiente bloque, la representación que hemos usado es la de bit.
- **Decision Type (Tipo de decisión)**
Existen dos tipos de decisiones la primera es hard, toma la decisión entre dos valores 0 o 1, en caso de que estén fuera de estos valores entonces no se computa, el segundo es soft decisión que pretende tomar todos los valores y discretizarlos.
- **Noise Variance (Varianza del ruido)**
Dispersión del ruido

4.3.6 Quantizer (Cuantizador)

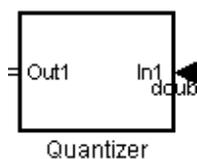


Figura 4.18
Cuantizador.

En la figura 4.18 se muestra el bloque de cuantización el cual se encarga de segmentar la señal dándole distintos niveles de energía, con este bloque lograremos que la señal tenga un comportamiento lo mejor discretizado de manera que se pueden detectar con mayor facilidad los bits.

Los parámetros que se pueden variar son los niveles de cuantización, y el tipo de detección los cuales se muestran en la figura 4.19.

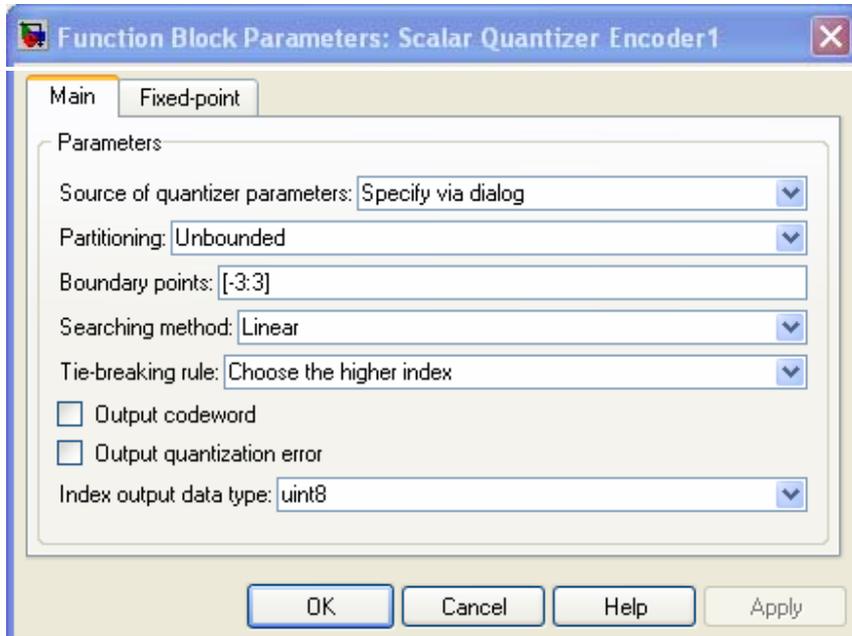


Figura 4.19 Cuadro configuración del cuantizador.

Descripción de las opciones

- **Source quantizer parameters (Origen de los parámetros del cuantizador)**
Especifica los parámetros del cuantizador, estos serán configurados en el cuadro de diálogo.
- **Partitioning (Partición)**
La señal puede ser delimitada en ciertos valores o simplemente en un determinado rango.
- **Boundary point (Puntos frontera)**
Son los valores en donde puede caer la señal.
- **Searching method (Método de búsqueda)**
Es el método por el cual se irán seleccionando los valores para determinar en que región tienen que estar.
- **Tie-breaking rule (Regla de decisión)**

En caso de que se que el valor este dentro de dos vecindades se elegirá el valor más próximo hacia arriba.

4.3.7 Viterbi Decoder (Decodificador de Viterbi)



Figura 4.20 Decodificador de Viterbi.

En la figura 4.20 se muestra el decodificador viterbi, el cual es el más usado para decodificar una señal que ha sido codificada mediante códigos convolucionales.

Su funcionamiento es el siguiente y se basa en las cadenas ocultas de Markov. Para poder elegir la señal recibida podríamos coger la salida de la señal después del demodulador de nuestro sistema de transmisión y compararla con todos los caminos posibles obtenidos en el diagrama de Trellis, hallar la distancia de Hamming es decir el número de bits en que difieren y elegir el camino mas optimo.

El objeto es ir eliminado las ramas que tengan una métrica mayor, esto siempre y cuando hayan llegado al mismo nodo. Esto se hace de manera reiterativa hasta tener toda la señal o el frame.

Cuadro de Configuración

En la figura 4.21 se muestra el bloque de configuración para un decodificador de Viterbi.

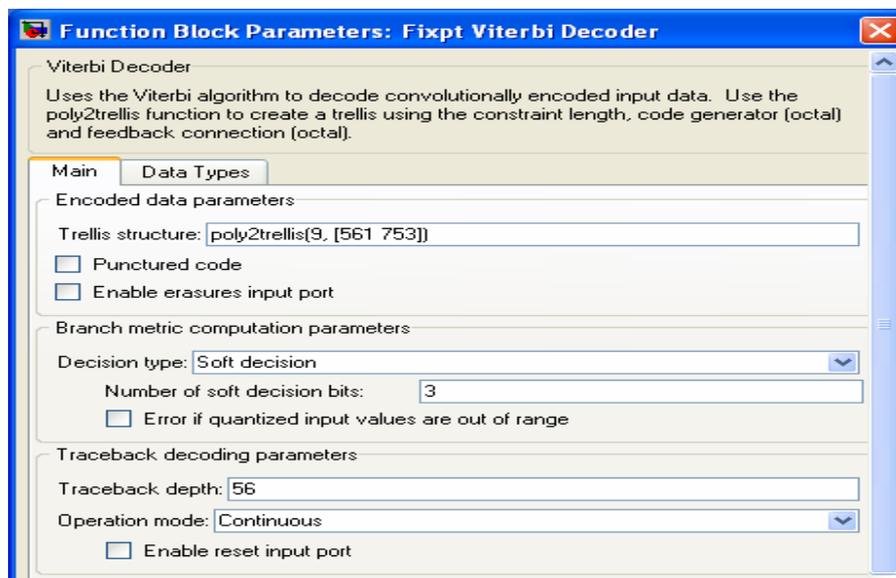


Figura 4.21 Cuadro de configuración para algoritmo de Viterbi.

Descripción de las opciones

- **Trellis structure (Estructura de Trellis)**
En este apartado pondremos en mismo polinomio de Trellis que usamos en el codificador convolucional.
- **Decision type (Tipo de decisión)**
Debido a que la señal ha sido filtrada en el cuantizador a un rango de valores, tendremos que decirle al algoritmo de Viterbi como lo hicimos.
- **Number of soft decision bits (Número de bits para una decisión suave)**
Como nosotros usamos decisión soft, entonces deberemos expresar la cantidad de bits que necesitamos para representar esos niveles.
- **Traceback depth (Profundidad de búsqueda o ramales)**
Tenemos la opción de decirle al algoritmo de trellis la cantidad máxima de ramales a los que puede acceder. Un ramal pequeño implica una cantidad enorme de errores ya que no tendrá la oportunidad de generar memoria y comparar, por tanto no se generará las tablas para los próximos bits. Un ramal grande implica mayor procesamiento por lo que repercutirá directamente en la velocidad del sistema.

4.3.8 Error Rate Calculation (Cálculo de la razón de error)

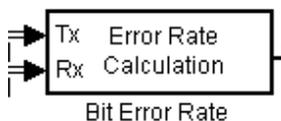


Figura 4.22
Cálculo del BER.

La figura 4.22 representa al bloque de cálculos para el BER, su función consiste en comparar cada uno de los bits que han sido enviados con los que se han recibido después de haber sufrido alteraciones en el canal. En el siguiente capítulo se verá con mayor detenimiento

Cuadro de configuración.

En la figura 4.23 se presenta el cuadro de diálogo para configurar el bloque el cual computa los bits erróneos.

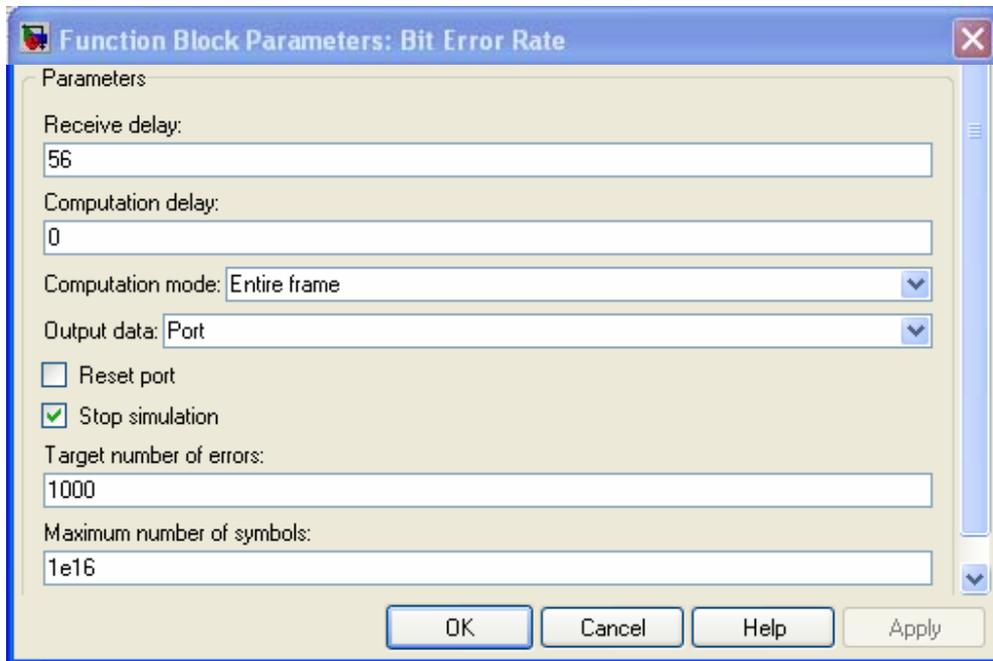


Figura 4.23 Cuadro de Configuración para computar los bits erróneos

- **Receive delay (Tiempo de espera)**
Se refiere al tiempo de espera antes de recibir el primer bit
- **Computation delay (Tiempo de computar)**
Es el tiempo en el cual empezará a computar los datos, este está estrechamente relacionado con la frecuencia y el tiempo de retardo de todo el sistema.
- **Output data (Salida de datos)**
En nuestro caso los datos serán enviados hacia una matriz, donde después serán procesados estos datos para su análisis
- **Target number of errors (Máximo número de errores)**
Es el número de errores necesario para terminar la simulación
- **Maximum number of symbols (Máximo número de símbolos)**
Es la cantidad máxima de símbolos o bits a computar

4.3.9 Bloque BER (Bit Error Rate)

En este bloque se hacen los cálculos para determinar la probabilidad de que la transmisión se haga con éxito y relacionar estos con la relación señal a ruido (SNR). El bloque se muestra en la figura 4.24

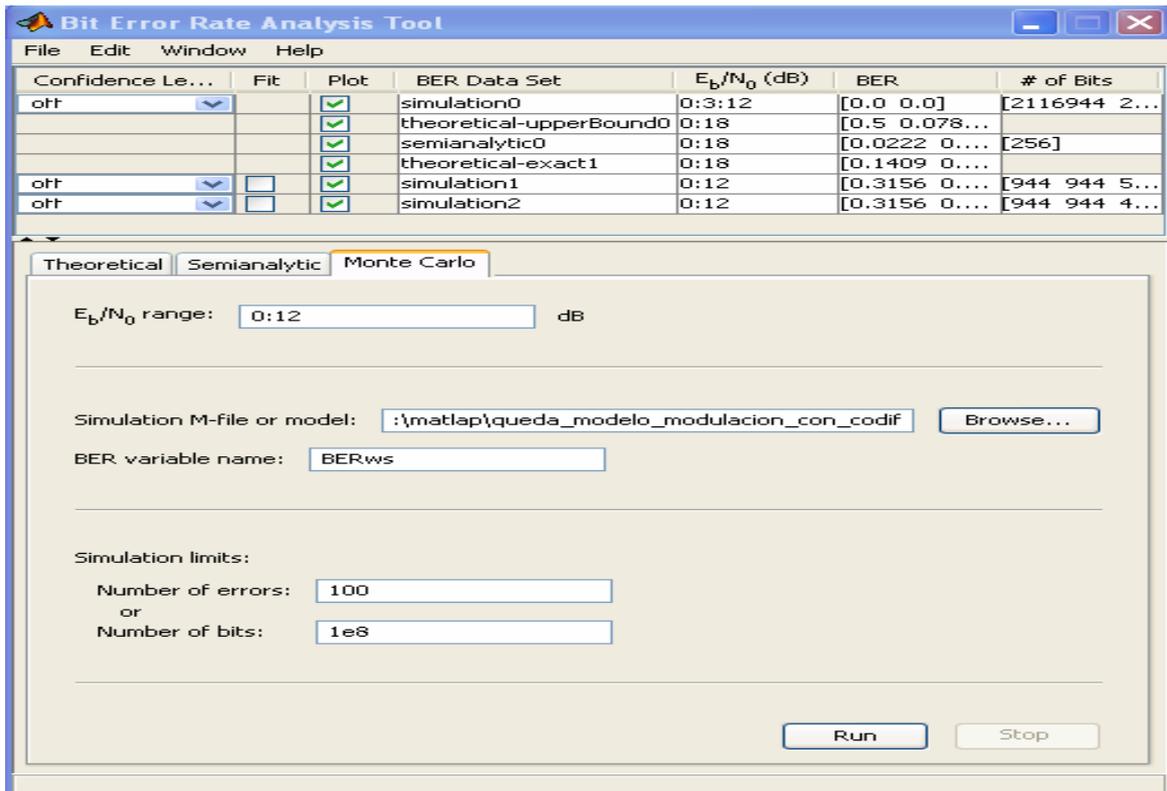


Figura 4.24 Bloque para calcular el BER.

Descripción de las opciones.

- **E_b/N_0**
Es la relación de energía por bit a densidad espectral de ruido.
- **Simulation M-File or model (Simulación de archivo .M o de un modelo)**
Aquí ponemos la dirección del modelo creado, el cual debe tener una variable hacia este workspace.

- **Simulation limits (Límites de la simulación)**

Estos son los parámetros establecidos dentro del Bloque de Cálculo de Error Rate. Los cuales don la cantidad de bits y/o el número de errores en un determinado tiempo.

4.4. Conclusiones

El modelo establece una alternativa al cálculo del Bit Error Rate, permitiendo modelar múltiples situaciones debido a su facilidad para cambiar los parámetros.

El proyecto contempla diversidad de modulaciones, las variables se han establecido de manera que se pueda aumentar el número de bits por periodo, con esto aumentaremos el throughput a nuestra elección.

El canal de ruido permite puntualizar mediante la varianza la distribución del ruido blanco gaussiano sobre los símbolos.

Los códigos correctores se pueden modificar, para optimizar el algoritmo dependiendo de la profundidad de las ramas. Se pueden establecer modelos de Trellis en donde se puedan hacer pruebas y establecer las ventajas de un modelo a otro.

Con la integración de nuevos servicios de calidad, se podrá usar este modelo para ayudar en la creación de nuevos sistemas, en los que se deberá poner como base la SNR.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Introducción

En este capítulo se da una descripción de los parámetros que se tomaron en cuenta para el modelado de la capa física con la finalidad de obtener la razón de error del bit (BER).

Se plantea la forma teórica para obtener la razón de error del bit y sus respectivas gráficas de manera que se pueda comparar con los resultados obtenidos y el buen funcionamiento del modelo.

La documentación que existe respecto a los diferentes códigos convolucionales y su relación con SNR (relación señal a ruido) son pocos, por lo que se han contemplado diferentes escenarios de manera que puedan quedar documentados estos para evaluaciones posteriores.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos con la simulación en forma de gráficas que modelan el BER, con diferentes códigos convolucionales y con distintas modulaciones.

En base a los resultados obtenidos se generan propuestas para la corrección de errores en relación a la señal a ruido.

5.2 Modelo para el cálculo del BER

Existen muchos parámetros establecidos para la calidad del servicio (QoS), dentro de los elementos considerados están: la razón de error en la transmisión, latencia, prioridad y la capacidad del canal (data rate). Nosotros nos enfocaremos en elemento de razón de error.

En los sistemas de comunicación digital, el primer indicador de la integridad del sistema es el bit error rate. El BER en un enlace es la medida de la frecuencia con la que un bit es recibido erróneamente en el receptor. Por ejemplo, un BER de $10E-7$ implica que en promedio se ha tenido un error de un bit en 10 millones al haber llegado al receptor.

Solamente se puede hacer esta medición una vez que la transmisión ha terminado. Nuestro proyecto esta basado en transmitir una secuencia de bits a través del enlace, monitoreando la salida del receptor y comparándolo con la secuencia original determinando cuantos bits de los que fueron transmitidos son erróneos.

Nuestra pregunta sería, ¿cual debe ser el BER en un sistema de comunicación? , muchos investigadores peritos en el área refieren que una respuesta eficaz sería tener un BER igual a $1E-10$. Sin embargo se considera satisfactorio un BER $1E-6$.

Pero la realidad nos dice que estos valores aunque son adecuados, no necesariamente implica que se tengan que cumplir, ya que depende de las necesidades propias del sistema. Por ejemplo en la transmisión de voz que usualmente necesita una tasa de transmisión de 64 kbps, un error en 30 segundos correspondería a $5 \times 10E-7$, el cual representa un error grande en la transmisión de voz. Pero si usamos una transmisión de 1Gbps, usando el mismo error en los 30 segundos, entonces su rendimiento BER será $3 \times 10E-11$.

Es necesario establecer una medida de predicción de manera que se pueda optimizar el diseño de los sistemas de comunicación. Para esta opción se ha buscado tener una medida en la probabilidad de transmisión de error (P_e). Éste es un análisis de diseño que aspira pronosticar la probabilidad de que los bits serán interpretados como erróneos en base a la señal, el modelo del sistema y métodos probabilísticos. De esta manera P_e tiene la función de interpretar si una señal ha sido corrompida por distorsión y ruido.

Aunque el BER no es lo mismo que la probabilidad de error, esperamos que el promedio acumulado de éste sea muy cercano a la probabilidad de error pronosticada.

Factores que intervienen para que la transmisión sea incorrecta

Existen multitud de elementos que pueden afectar en la transmisión de la señal.

Primero, la forma de la señal puede ser distorsionada debido a una respuesta al impulso que no es ideal sobre el canal.

Segundo, el canal puede agregar ruido a la señal, lo que trae como consecuencia que la forma de la señal esté corrompida. En dado caso que existan no linealidades se agregará una distorsión en la señal.

El mismo receptor puede tener un mal acoplamiento, y agregará ruido lo que hará que el circuito de decisión tenga que tomar decisiones más complejas.

Probabilidad de Error

En un sistema digital, nosotros debemos de considerar una transmisión binaria en la información, esta información estará representada por una secuencia lógica de unos (1) y ceros (0). Es importante notar que ésta es una secuencia simple lógica

que será transmitida a través del enlace, y el trabajo del enlace es transmitir esta secuencia con la mínima cantidad de errores.

En un esquema de transmisión binaria, existen dos caminos que se podrían tener al recibir el bit. Primero, si un 1 es transmitido y existe la suficiente distorsión y ruido de manera que el receptor decide que ha recibido un 0.

En términos probabilísticos nos preguntaríamos cual es la probabilidad de decidir un 0 cuando un 1 fue transmitido a través del enlace. De manera similar si un 0 es transmitido y el receptor decidió que este es 1, entonces se ha cometido un error.

De esta manera podemos representar la probabilidad de error como, la suma de las dos probabilidades la cual esta representada en la ecuación 5.1.

$$P_e = Pr\{1|0\} + Pr\{0|1\} \tag{Ec. 5.1}$$

La probabilidad de error puede escribirse como el producto de las probabilidades. Nosotros primero conocemos como son los datos, y que es una secuencia de bits. Estos se representa con la frecuencia relativa en los datos, donde la probabilidad de 1 en esa secuencia se representa como $Pr\{1\}$ y para 0 como $Pr\{0\}$.

$$Pr\{1\} = 1 - Pr\{0\} \tag{Ec. 5.2}$$

Definimos que la probabilidad de que exista error tanto en 1 como en 0 es la misma por lo que $Pr\{1\} = Pr\{0\} = 0.5$

De esta manera podremos calcular la probabilidad estimada como:

$$P_e = Pr\{error|0\} * Pr\{0\} + Pr\{error|1\} * Pr\{1\} \tag{Ec. 5.3}$$

Para el calculo de BER consideramos que $Pr\{1\}$ y $Pr\{2\}$ son variables aleatorias y que los bits son equidistantes y de signo contrario tenemos, lo cual se muestra en la figura 5.1:

Para uso práctico consideraremos S1 como el valor de 1 y a S2 como el valor de 0, aunque esto mismo se podríamos hacerlo para el caso de n bits.

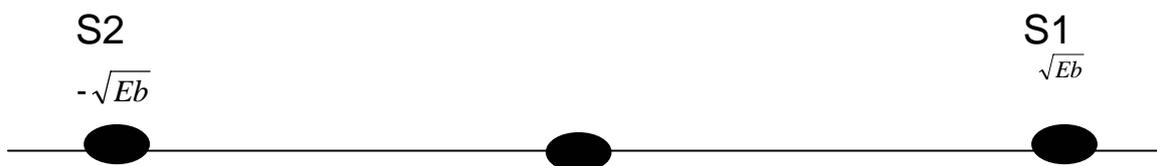


Fig. 5.1 Distribución de la energía en un sistema binario

Debido a que estas funciones describen a una variable con distribución gaussiana lo podemos poner de la siguiente manera. Donde “r” representa el valor que puede tomar la señal, en la figura 5.2 se muestra la densidad probabilística de la señal S2 y la señal S1.

$$f_{r/s}(r | s1) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-(r-\sqrt{Eb})^2 / N_0} \tag{Ec. 5.4}$$

$$f_{r/s}(r | s1) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-(r+\sqrt{Eb})^2 / N_0} \tag{Ec 5.5}$$

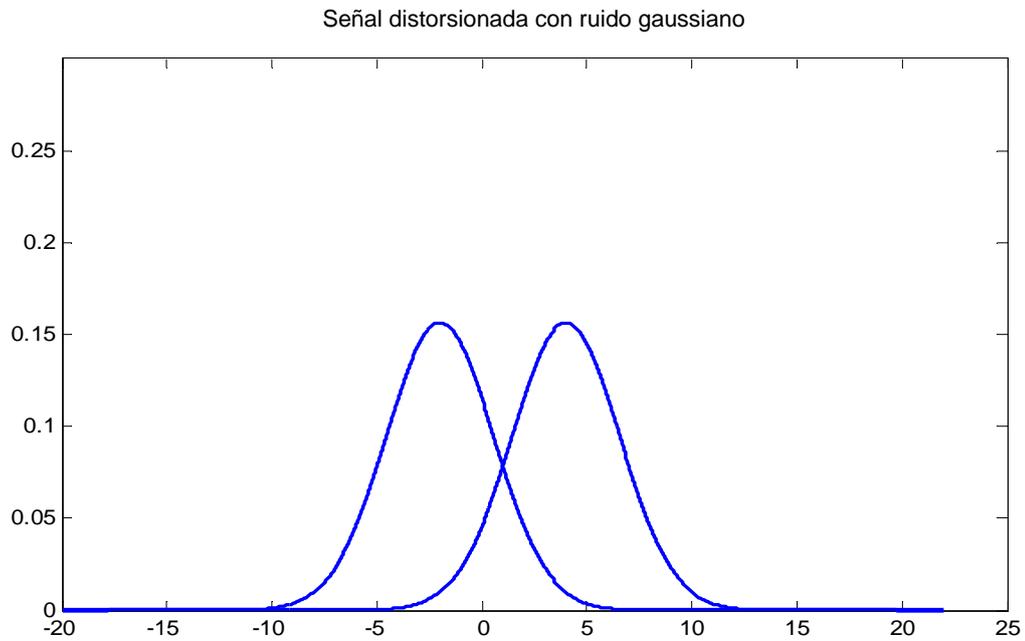


Fig. 5.2 Representación de la Densidad Probabilística para decisión binaria

Donde la Ec. 5.4 y la Ec. 5.5 representan la función de densidad probabilística.

Regla de decisión:

Si $r > 0$ se decide enviar S1 : S1 representa un 1 lógico

$r < 0$ se decide enviar S2 : S2 representa un 0 lógico

Cuando se envía S2 la probabilidad de error es la probabilidad de que el ruido exceda $(Eb)^{1/2}$, del mismo modo cuando se envía S1 la probabilidad de error es la probabilidad de que el ruido exceda $-(Eb)^{1/2}$

Considerando que la señal puede estar dentro de un rango de valores tenemos:

$$P(e|S1) = P(e|S2) = P[r < 0 | S1] \tag{Ec. 5.6}$$

Desarrollado en términos de PDF tenemos:

$$\begin{aligned} P_e &= \int_{-\infty}^0 (r | s1) dr = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-(r - \sqrt{Eb})^2 / N_0} dr \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \int_{-\infty}^{Eb} e^{-r^2 / N_0} dr \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-r^2 / 2}}{\sqrt{2Eb / N_0}} dr \end{aligned} \tag{Ec. 5.7}$$

Considerando a Q(x)

$$Q(x) \Delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Eb} e^{-r^2 / 2} dr \tag{Ec. 5.8}$$

Comparando Ec. 5.7 con Ec. 5.8 tenemos:

$$BER = Q(\sqrt{2Eb / N_0}) \tag{Ec. 5.9}$$

De esta manera hemos obtenido el BER para un sistema binario, como lo es BPSK.

De manera similar se calcula el BER para QPSK y 16QAM.

A continuación se muestran las ecuaciones que describen estos modelos.

La ecuación 5.10 describe el comportamiento del error del bit y el símbolo cuando usamos una modulación BPSK

$$P_s = P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Las ecuaciones 5.11 y 5.12 nos muestran respectivamente la probabilidad de error para el símbolo y el bit en un sistema QPSK.

$$P_s = 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\left[1 - \frac{1}{2}Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)\right] \quad (\text{Ec. 5.11})$$

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (\text{Ec. 5.12})$$

Como podemos observar la probabilidad de bit entre BPSK y QPSK no varía esto es debido a que la cantidad de bits es el mismo, pero se diferencian entre sí por los símbolos o palabras generadas.

En la ecuación 5.13 y la ecuación 5.14 se muestra respectivamente la probabilidad de error del símbolo y el bit, para una modulación 16QAM.

$$P_s = 4 \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} Q\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{kE_b}{N_0}}\right) - 4 \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}}\right)^2 Q^2\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{kE_b}{N_0}}\right) \quad \text{Ec. 5.13}$$

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \quad (\text{Ec. 5.14})$$

$$\times \sum_{k=1}^{\log_2 \sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^k)\sqrt{M}-1} \left\{ (-1)^{\lfloor \frac{i2^{k-1}}{\sqrt{M}} \rfloor} \left(2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \right\} Q\left((2i+1) \sqrt{\frac{6 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}} \right)$$

Donde M es el número de símbolos para nuestro caso es 16.

A continuación en la figura 5.3 se muestra el BER para diferentes modulaciones.

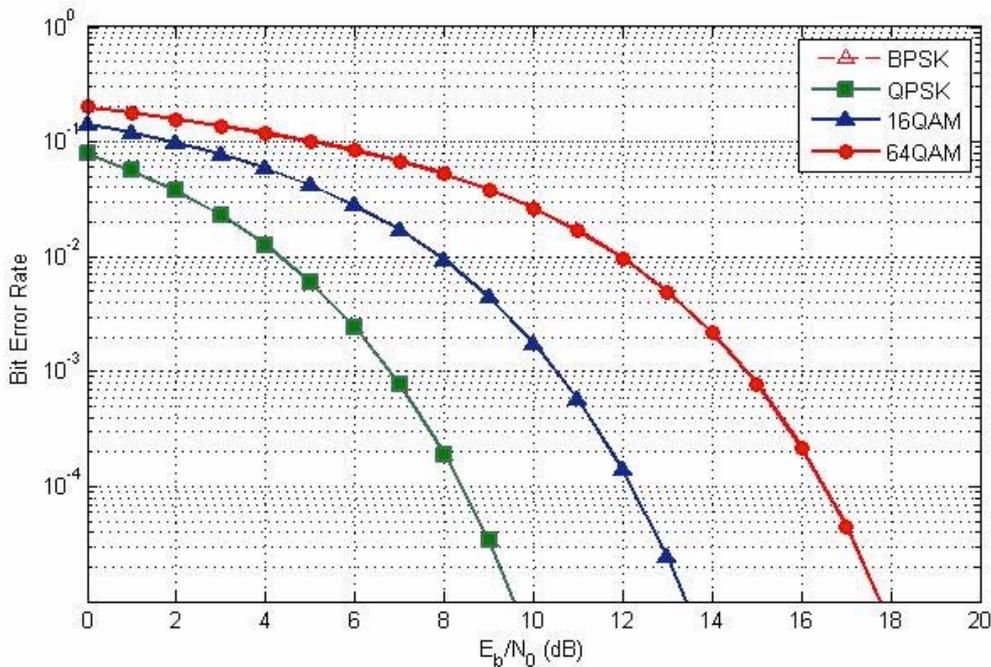


Figura 5.3. BER para modulación BPSK, QPSK y QAM

En la gráfica 5.3 podemos observar que el BER es el mismo para BPSK y QPSK, como se demostró matemáticamente.

Debido a la cercanía entre los bits en un sistema con una mayor modulación como lo es 16QAM y 32QAM. La interferencia entre símbolos será mayor y traerá como consecuencia un BER más alto.

Aunque debemos de recordar las ventajas que una modulación mayor acarrea, entre las más importantes es el que ancho de banda ocupado para transmitir se divide entre el número de bits representados en una palabra código.

Como lo mencionamos anteriormente un BER aceptable es menor de 1E-6

No con menos importancia el cálculo del SER (symbol error rate) y el PER (packet error rate) que es la probabilidad de transmitir un símbolo o paquete erróneo respectivamente, estos cálculos se toman en base al BER.

Se calculan de la siguiente manera:

$$\text{SER} = \text{BER} \cdot \text{numero_de_bits} \quad (\text{Ec. 5.15})$$

$$\text{PER} = 1 - (1 - \text{BER})^{(\text{número_de_bits})} \quad (\text{Ec. 5.16})$$

En la gráfica 5.4 se muestra el SER para distintas modulaciones

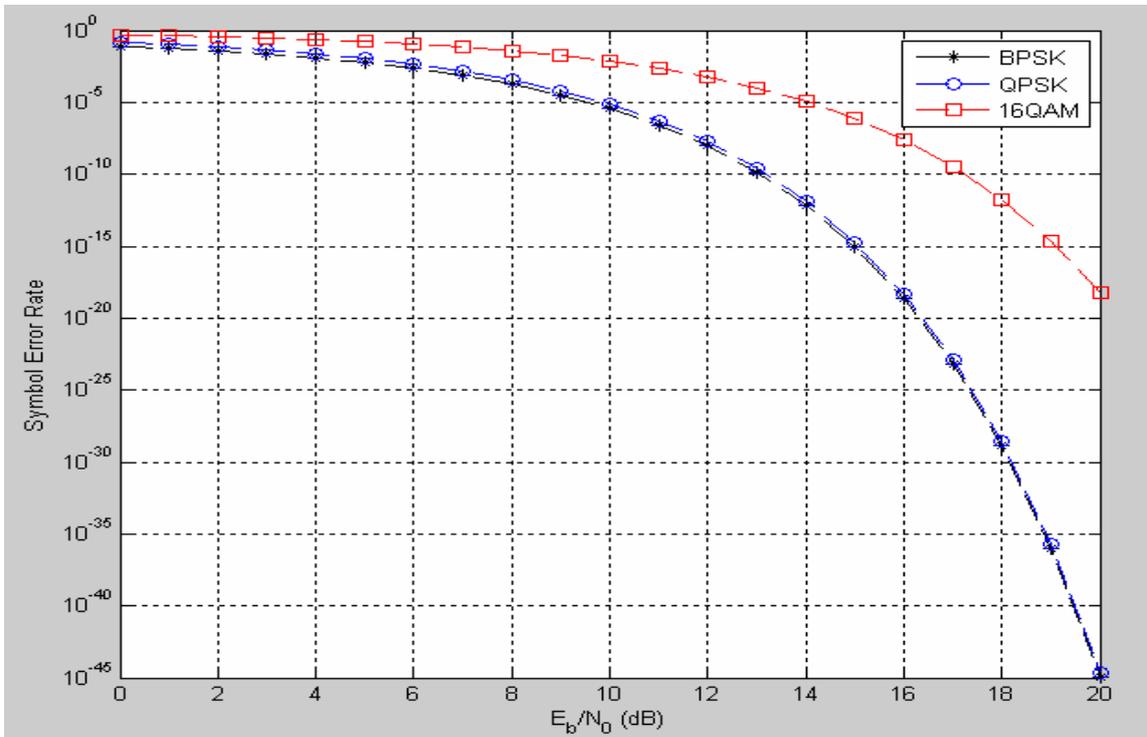


Fig. 5.4 SER para diferentes Modulaciones con AWGN

En la siguiente grafica (5.5) se muestra el PER para distintas modulaciones

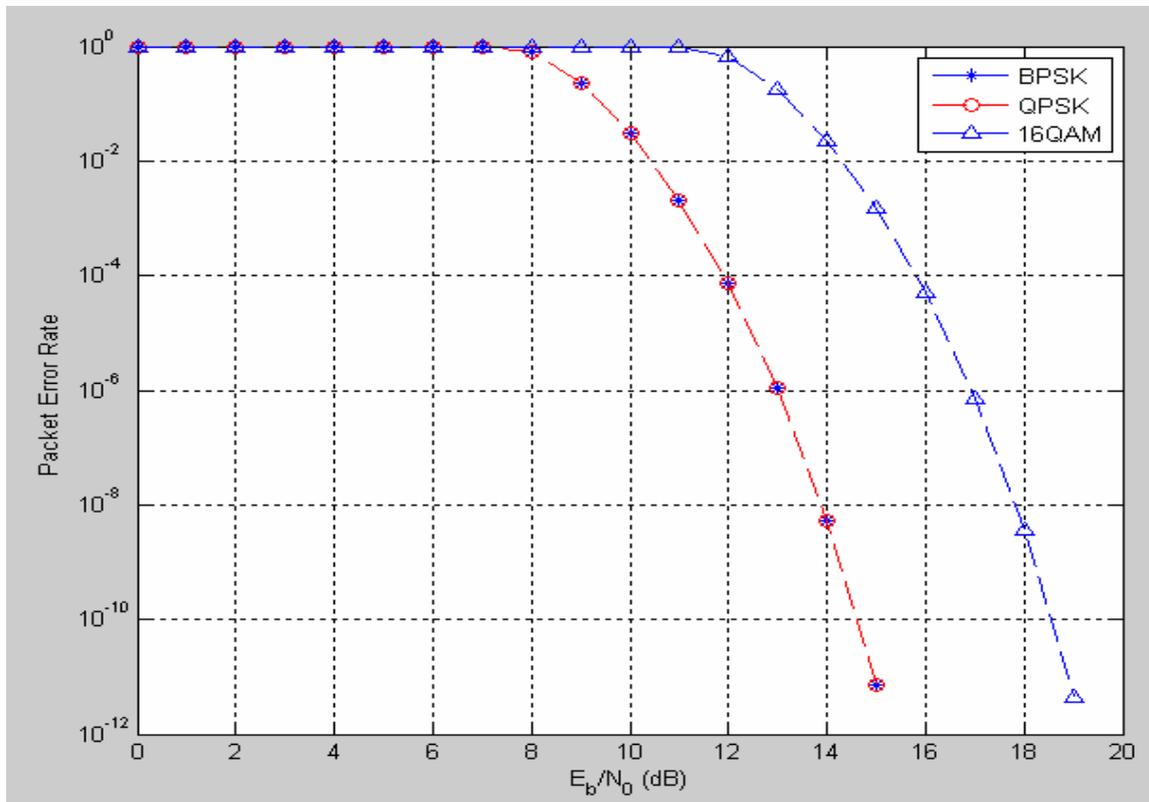


Fig. 5.5 PER para BPSK, QPSK y 16QAM con AWGN.

En la grafica 5.6 se muestra una comparación del BER teórico con el que fue modelado por nuestro sistema, como podemos observar la desviación que existe es mínima por lo que se acepta el sistema, ya que se ha creado en un entorno variable, en el que el ruido interviene de manera aleatoria.

Los parámetros que se establecieron son los siguientes, estos elementos permanecerán constantes a menos que se advierta lo contrario.

- E_b/N_0 varía desde 0dB hasta 20dB, con salto de 1dB
- Potencia de la señal 1Watts
- Periodo de muestreo 14.29ms o bien una frecuencia de 70Mhz
- La trama es de 1000 bytes

- Modulación BPSK, QPSK y 16QAM
- La distribución del ruido.

$$\text{VarianzaAWGN} = (1 \text{ watt} \cdot 0.005) / (14.29 \text{ ms} \cdot (\text{Numero de símbolos} \cdot E_b/N_0) / 10) \quad (\text{Ec. 5.17})$$

- La toma de decisiones en el cuantizador es de tipo suave, y viene relacionada con la distribución del ruido este queda como:

$$\text{Varianza_cuantizador} = 1 / (10^{((E_b/N_0 - 10 \cdot \log_{10}(2)) / 10)}) \quad (\text{Ec 5.18})$$

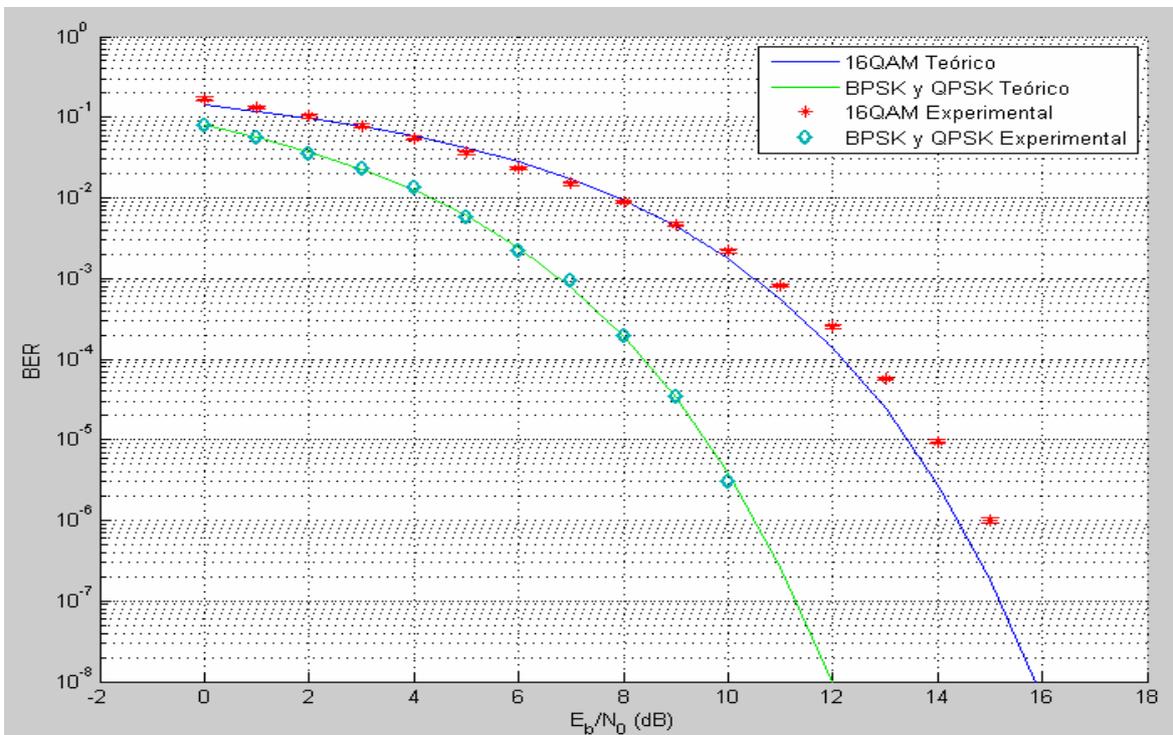


Figura 5.6 Comparación del modelo teórico con el modelo

5.3 Análisis de desempeño

El correcto desempeño en el enlace, viene intrínsecamente relacionado con el BER, este parámetro debe ser utilizado para el diseño de los sistemas de comunicaciones. De manera que se pueden prevenir funcionamientos incorrectos y poder con antelación predecirlos.

En esta sección se presentan distintos escenarios que mostrarán el comportamiento dinámico de un canal, cuando es configurado bajo diferentes

esquemas de corrección y modulación. Las primeras simulaciones muestran el desempeño de la red con una tasa de codificación de $\frac{1}{2}$, las consecutivas aumentaran la proporción de la razón del código.

Como se menciono antes la decisión que se tomara en el cuantizador es tipo suave.

5.3.1 Escenario para el Código Convolutacional de $\frac{1}{2}$

La tasa de codificación de $\frac{1}{2}$ significa que por cada bit que transmitamos se genera otro bit que será de redundancia.

Código Convolutacional (9, [561 753])

La función que simula el polinomio de trellis es: `poly2trellis(9, [561 753])`, es decir se tienen 8 registros, los polinomios generadores están representados por los números octales 561 y 753 para sus respectivas salidas.

La figura 5.7 muestra los resultados en las distintas modulaciones (QPSK y BPSK) cuando se usa un CC (9, [561 753]).

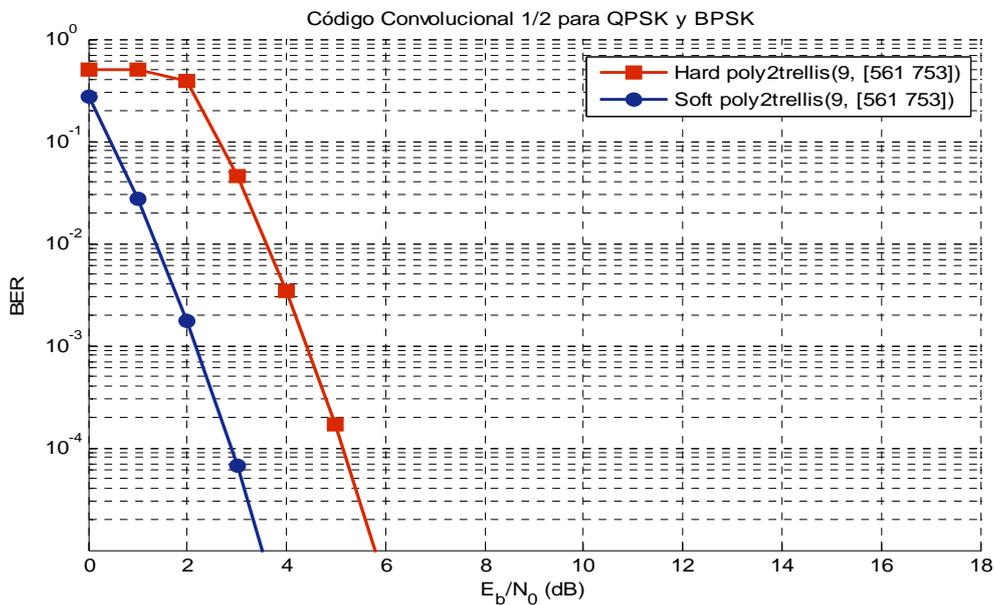


Fig. 5.7 BER para CC $\frac{1}{2}$ para BPSK y QPSK

Como se puede observar en la figura 5.7 existe una diferencia de 2dB promedio, entre una decisión que es de tipo Dura y una de tipo Suave, lo que nos permite

asegurar que dentro de un sistema, la propuesta más viable ante un canal con ruido es la decisión tipo Suave. Encontramos que el SNR mínimo para una transmisión modesta se encuentra en una SNR superior a 5dB para decisión suave mientras que para fuerte es superior a los 7dB.

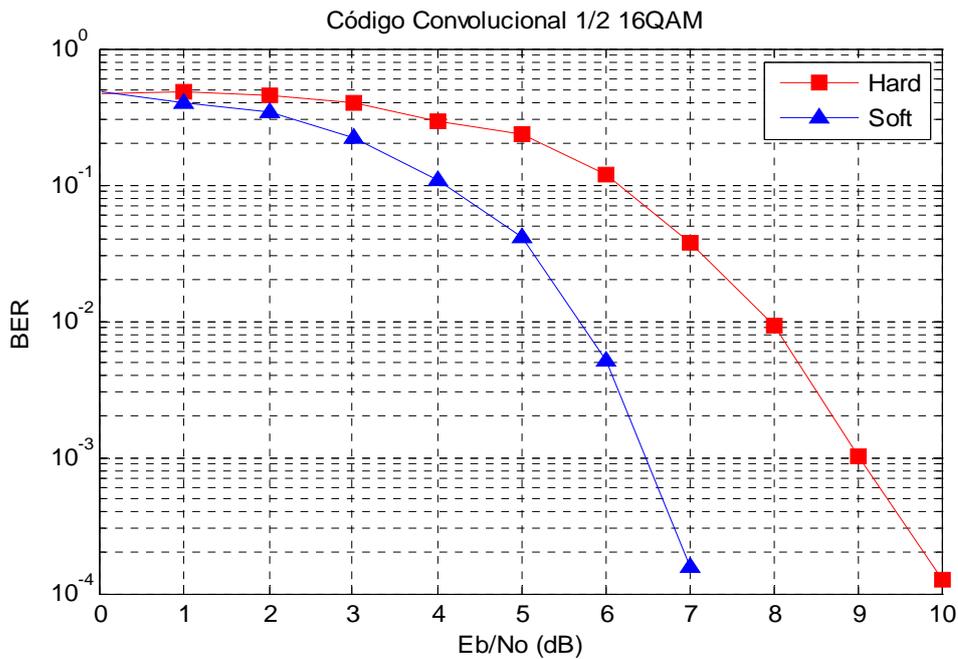


Fig. 5.8 BER para CC 1/2 para 16QAM

La figura 5.8 nos muestra la influencia del código convolucional con rate de 1/2 sobre una modulación 16QAM. Se puede observar que una SNR correcta para el envío y recepción de información esta dado en los 7dB.

Observaciones

El código convolucional (9, [561 753]), es una alternativa real para mejorar la calidad de información ya que tanto en modulación PSK como QAM se puede observar una reducción considerable del error respecto a la SNR.

Como se puede observar en la tabla 5.1 existe una ganancia de 6.5dB respecto a la modulación sin codificación en QPSK y BPSK para una detección suave. Mientras que para 16QAM se obtuvo una mejoría de 7dB en la misma detección

	Modulación sin codificación			CC ½ (9, [561 753]) SUAVE			CC ½ (9, [561 753]) DURA		
BER	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM
1E-6	10.5dB	10.5dB	15dB	4dB	4dB	8dB	6.5dB	6.5dB	13dB

Tabla 5.1 SNR respecto a BER 1E-6 con CC ½ (9, [561 753])

Código Convolutacional (9, [751 557])

La función que simula el polinomio de trellis es: poly2trellis(9, [751 557]), es decir se tienen 8 registros, los polinomios generadores están representados por los números octales 751 557 para sus respectivas salidas.

La figura 5.9 nos muestra el comportamiento de la señal cuando es implementado un código convolutacional de 9 registros, con polinomios generadores 751 y 557. Con un razón de datos de ½.

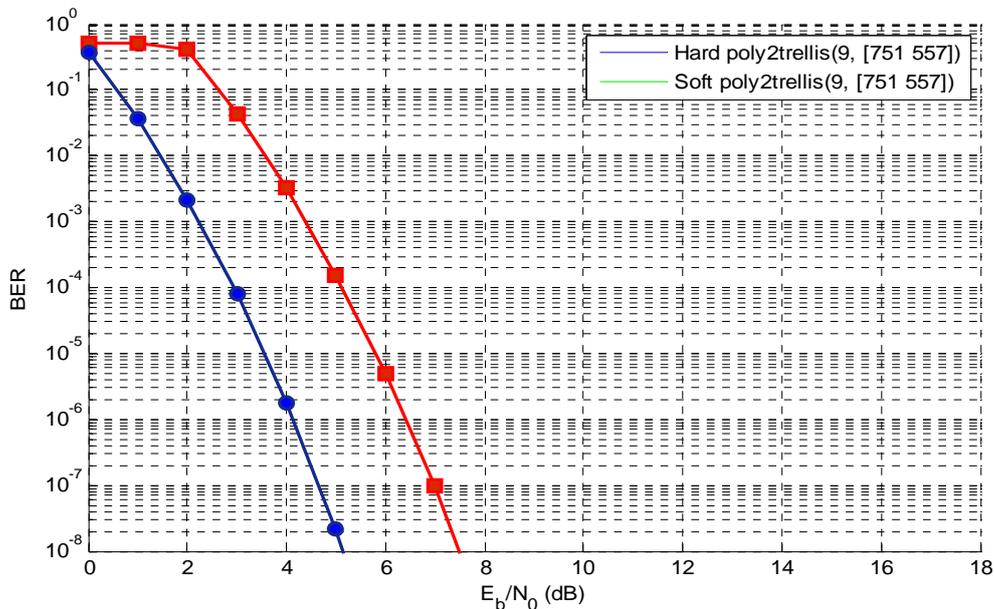


Fig. 5.9 BER para CC ½ para BPSK Y QPSK

En la figura 5.10 se muestra el BER cuando la señal es sometida a un CC de $\frac{1}{2}$ y se usa una técnica de modulación de 16QAM.

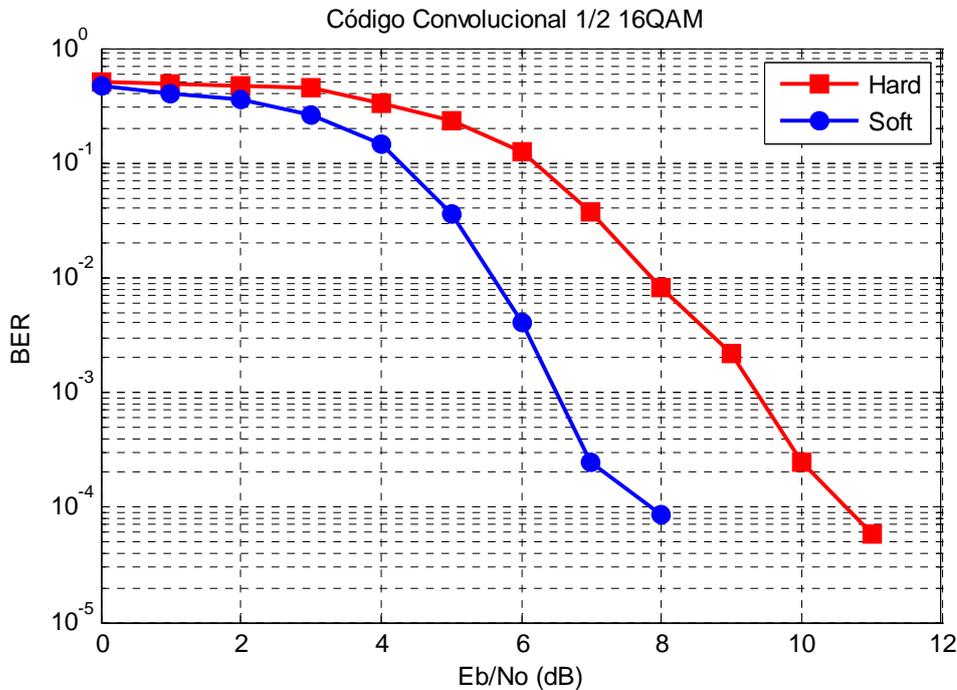


Fig. 5.10 BER para CC $\frac{1}{2}$ para 16QAM

Observaciones.

Como se puede ver en la tabla 5.2 la ganancia entre un enlace sin codificación y otro con codificación para QPSK y BPSK es de 6.3dB para detección Suave y de 4.5 para Dura lo que nos indica que el código convolutivo tiene menor corrección de datos que el CC anterior. Existió el mismo problema para la modulación 16QAM ya que la diferencia entre el CC anterior y este fue de aproximadamente 2dB.

BER	Modulación sin codificación			CC $\frac{1}{2}$ (9, [751 557]), SUAVE			CC $\frac{1}{2}$ (9, [751 557]), DURA		
	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM
1E-6	10.5dB	10.5dB	15dB	4.2dB	4.2dB	10dB	6.5dB	6.5dB	14.7dB

Tabla 5.2 SNR respecto a BER 1E-6 con CC ½

Como parte importante de esta tesis esta la incluir CC que tengan menos registros lo que hace que su tiempo de operación real sea disminuido, nosotros no tenemos un periodo de latencia grande cuando se trata de aplicaciones que deben trabajar en tiempo real, por lo que he decido experimentar con códigos con estructuras más simples.

Código Convolutacional (6, [65 57])

A continuación en la figura 5.11 y 5.12 se muestran los efectos de estos códigos que si bien en la parte de corrección no son mejores, si nos dan una respuesta satisfactoria para la corrección de estos errores. Y que se puede tomar como adecuada ya que hay mecanismos adyacentes que pueden corregir estos pequeños errores.

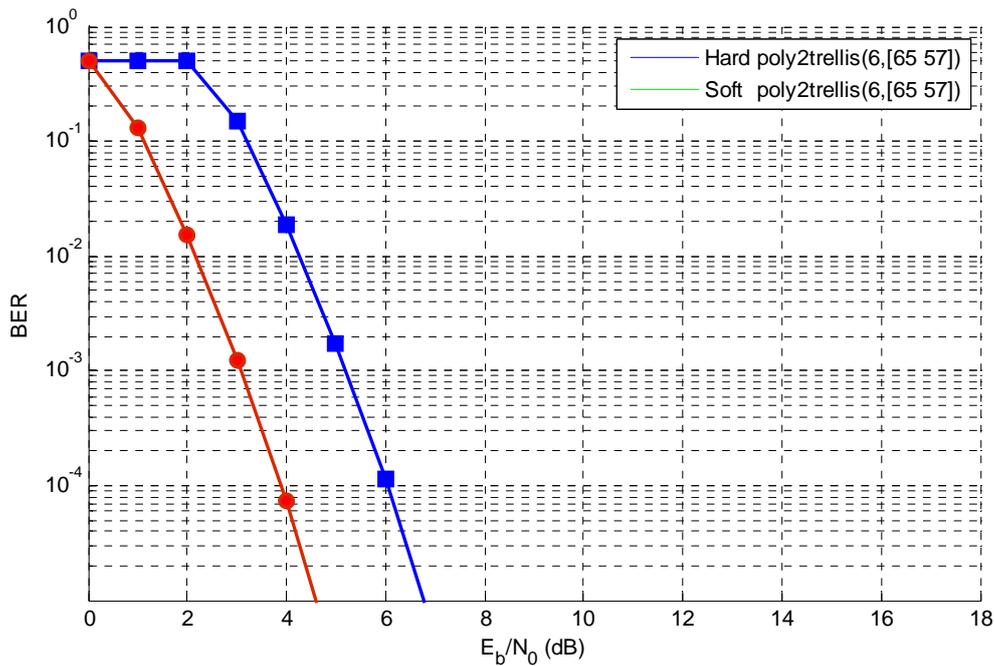


Fig. 5.11 BER para CC ½ para BPSK y QPSK

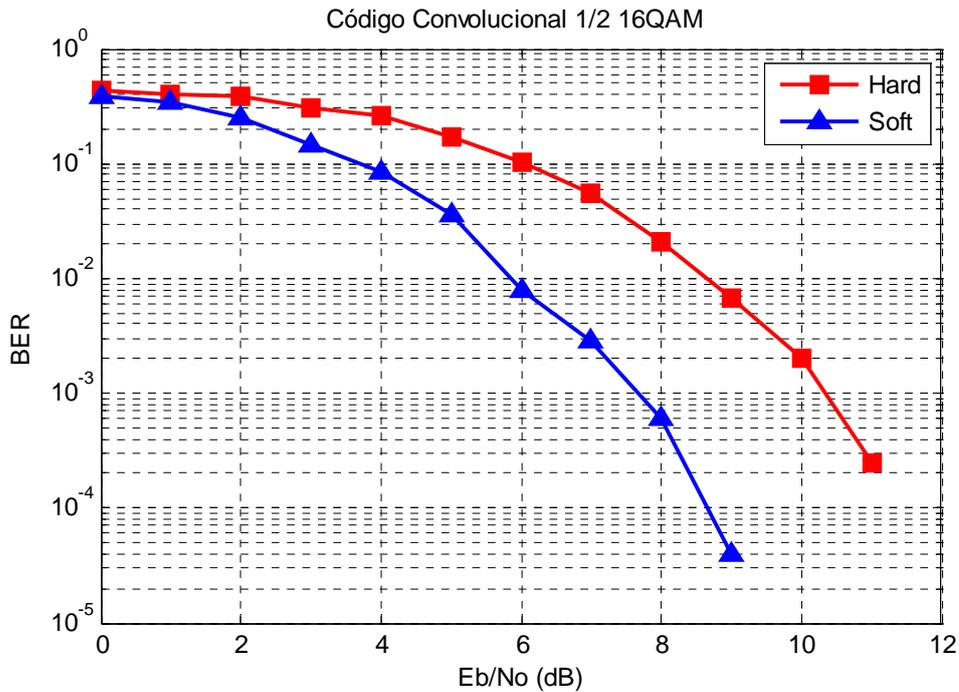


Fig. 5.12 BER para CC 1/2 para 16QAM

Observaciones.

Como parte de las pruebas se han considerado CC con menores registros a manera de encontrar las distribuciones de estas con respecto a las anteriores, es bien sabido que a menor número de registro se gana tiempo en el procesamiento, pero se pierde la capacidad de corrección. Como se muestra en la tabla 5.3 la SNR ha aumentado en aproximadamente 2dB con respecto a los CC de 8 registros.

	Modulación sin codificación			CC 1/2 (6, [65 57]) SUAVE			CC 1/2 (6, [65 57]) DURA		
BER	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM

1E-6	10.5dB	10.5dB	15dB	6dB	6dB	12.5dB	8dB	8dB	16dB
------	--------	--------	------	-----	-----	--------	-----	-----	------

Tabla 5.3 SNR respecto a BER 1E-6 con CC 1/2 (6, [65 57])

Código Convolutacional (6, [75 57])

En este CC hemos cambiado el polinomio generador de manera que podamos hacer comparaciones entre CC con los mismos registros.

En la figura 5.13 y 5.14 se muestra el BER con respecto a un CC de 5 registros los cuales tienen el polinomio [75 57], tanto para BPSK, QPSK y 16QAM.

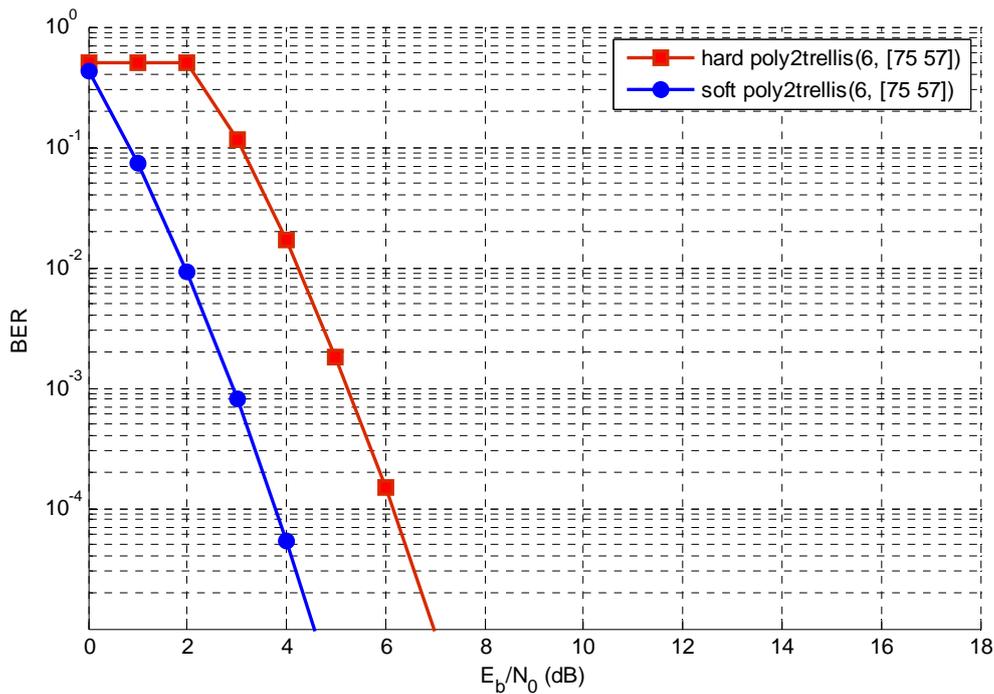


Fig. 5.13 BER para CC 1/2 para BPSK y QPSK

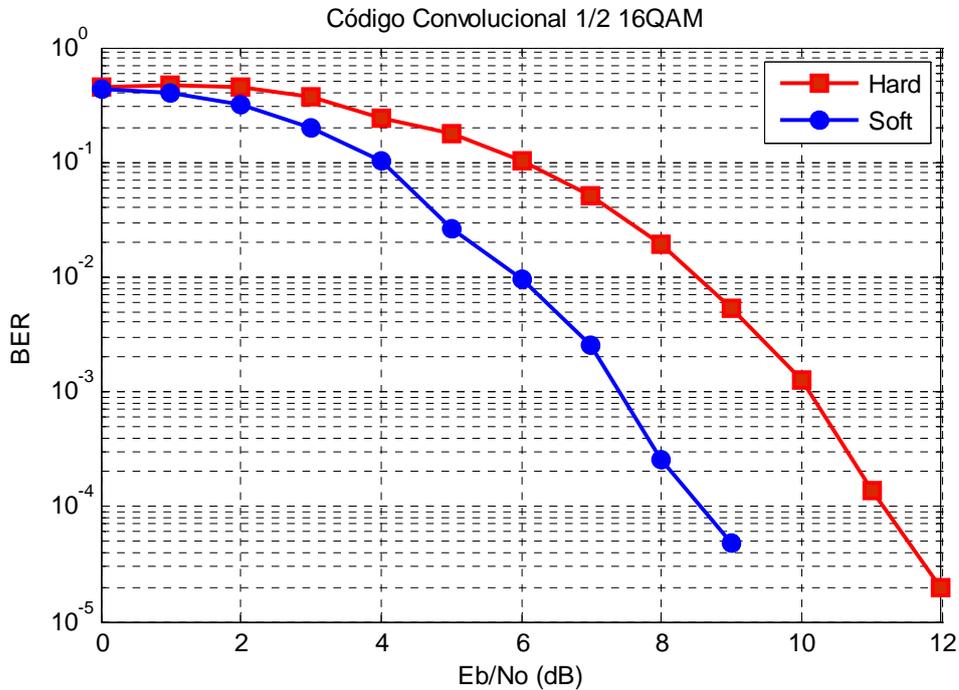


Fig. 5.14 BER para CC 1/2 para 16QAM

Observaciones.

En la tabla 5.4 se muestra una comparación entre las diferentes decisiones para un CC (6, [75 57]), en sus modulaciones BPSK, QPSK y 16 QAM. Observando que tiene un mejor comportamiento en las modulaciones de BPSK y QPSK que el anterior, y que puede estar dentro de los posibles códigos para usarse en estas modulaciones.

BER	Modulación sin codificación			CC 1/2 (6, [75 57])SUAVE			CC 1/2 (6, [75 57])DURA		
	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM
1E-6	10.5dB	10.5dB	15dB	5.2dB	5.2dB	11dB	7.2dB	7.2dB	17dB

Tabla 5.4 SNR respecto a BER 1E-6 con CC 1/2 (6, [75 57])

Código Convolutivo (7, [171 133])

Como parte de la propuesta esta encontrar un polinomio que tengan mayores ventajas sobre los polinomios anteriores, así que se decidió en base al comportamiento de estos. Tomar una media de manera que se pueda ver beneficiado el sistema en dos aspectos importantes como lo es una eficiencia en los cálculos poniendo una media de el número de registros y por otra parte un polinomio lo suficientemente capaz de adecuarse a un BER moderado.

En la figura 5.15 y 5.16 se muestra el BER cuando la señal es transmitida a través de un enlace que contiene ruido aditivo gaussiano, y que esta sujeto a ser corregido mediante un CC (7, [171 133]).

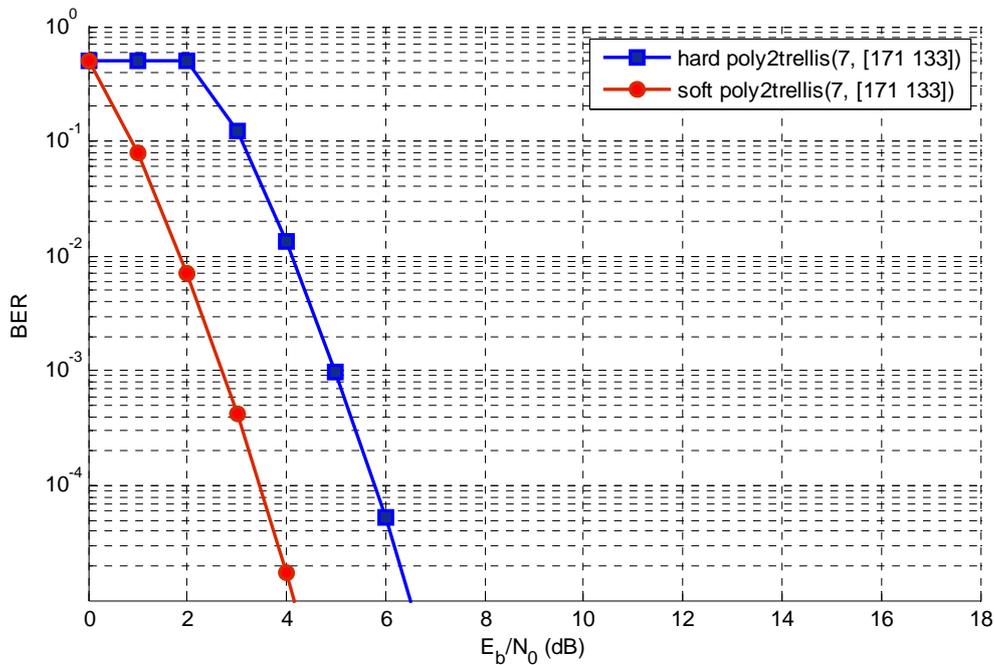


Figura 5.15 BER para CC 1/2 para BPSK y QPSK

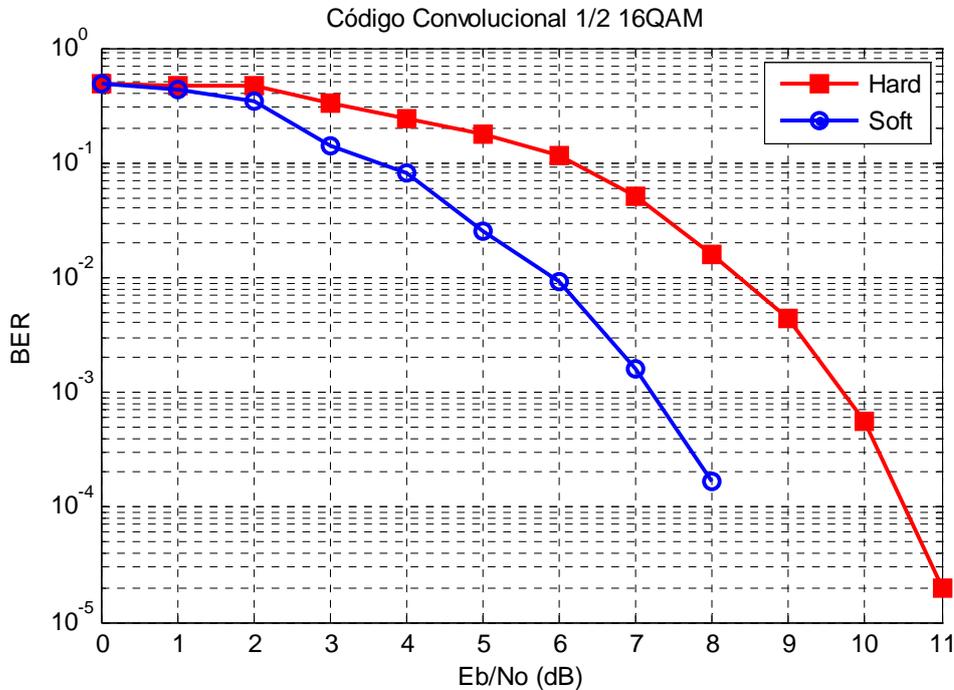


Fig. 5.16 BER para CC 1/2 para 16QAM

Observaciones

Habiendo hecho una comparación de la Tabla 5.5 con los resultados de todas los CC anteriores, y como se había previsto podemos observar que esta codificación es lo suficientemente adecuada se encuentra por debajo de la media, así que si el sistema con el que contamos no es lo suficientemente capaz para discriminar entre una modulación u otra, o el sistema no cuenta con los suficientes recursos entonces el CC adecuado es este, ya que se adapta de una manera adecuada ante diferentes modulaciones.

BER	Modulación sin codificación			CC 1/2 (7, [171 133]).SUAVE			CC 1/2 (7, [171 133]). DURA		
	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM
1E-6	10.5dB	10.5dB	15dB	4.8dB	4.8dB	12dB	6.8dB	6.8dB	15dB

Tabla 5.5 SNR respecto a BER 1E-6 con CC 1/2 [171 133]).

5.3.2 Escenario para el Código Convolutivo de 1/3

El CC de 1/3 agrega dos bits de redundancia esto puede ser necesario en ambientes hostiles, donde existan lluvias, humedad o fenómenos meteorológicos.

Código Convolutivo (9, [561 113 500])

En la figura 5.17 y 5.18 se muestra la afectación de la señal cuando se pasa a través de una canal AWGN, y se corrige mediante un CC (9, [561 113 500]).

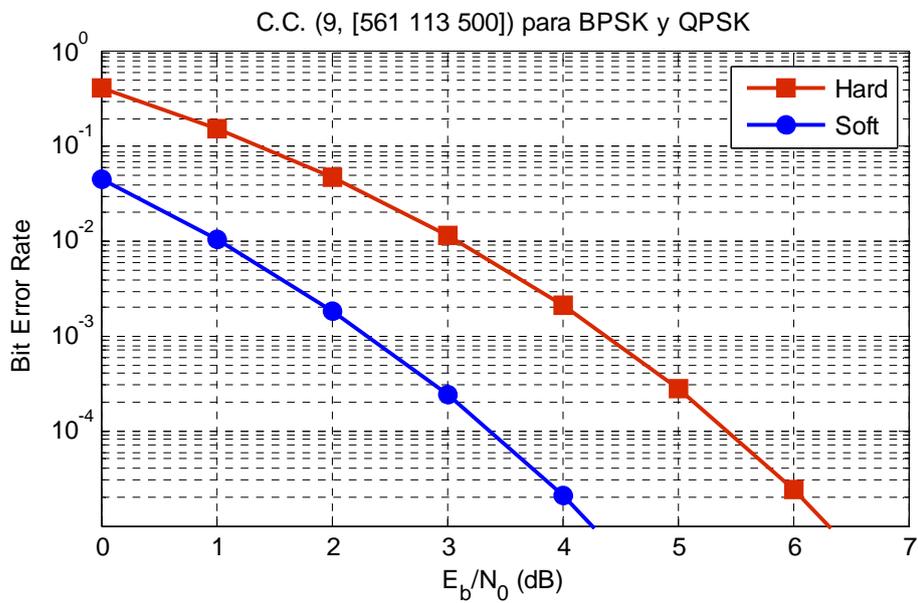


Fig. 5.17 BER para CC $1/3$ para BPSK y QPSK

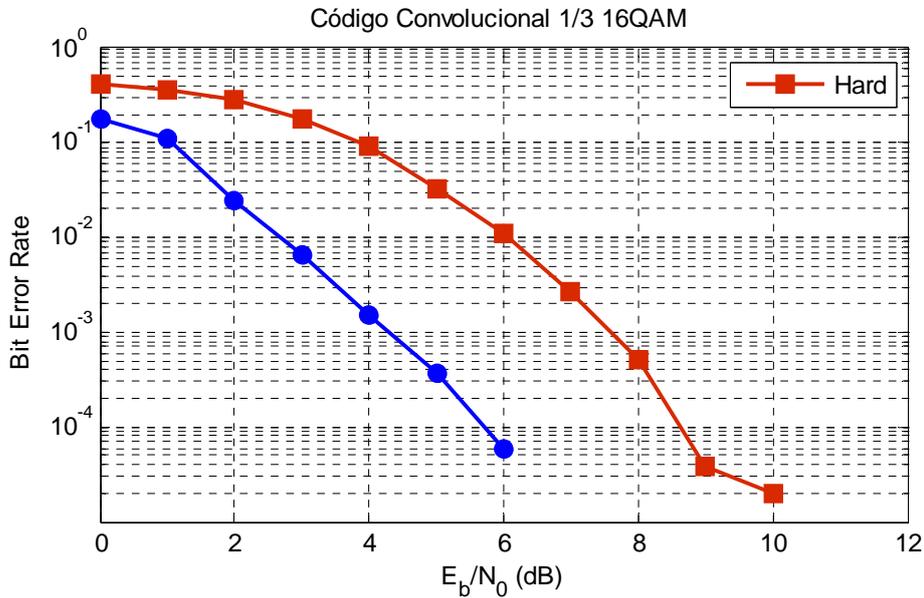


Fig. 5.18 BER para CC $1/3$ para 16QAM

Observaciones.

Como se puede observar en la tabla 5.6 este CC es bastante efectivo para corregir errores cuando se tiene una modulación 16QAM, esta tiene 8 registros y cuenta con tres salidas las cuales están formadas por polinomios linealmente independiente, la manera en que se escogieron busca abarcar la mayor combinación de resultados posibles de manera que pueda corregir la mayor cantidad de bits.

BER	Modulación codificación sin			CC $1/3$ (9, [561 113 500]) SUAVE			CC $1/3$ (9, [561 113 500]) DURA		
	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM
1E-6	10.5dB	10.5dB	15dB	5.3dB	5.3dB	8dB	7.3dB	7.3dB	11dB

Tabla 5.6 SNR respecto a BER 1E-6 con CC 1/3 (9, [561 113 500]).

Código Convolutivo (9, [525 253 444])

La figura 5.19 y 5.20 muestran el BER cuando un CC (9, [525 253 444]) es incluido dentro del enlace.

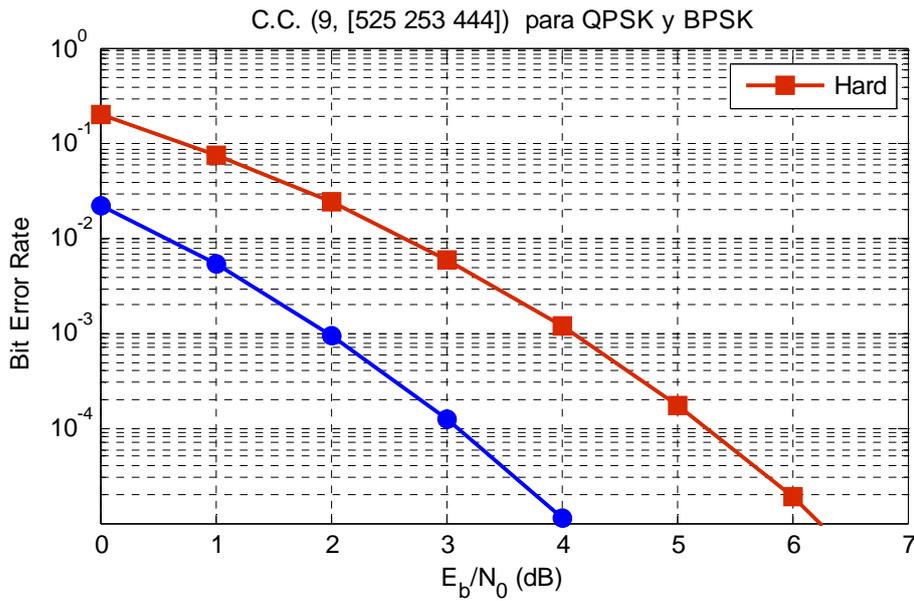


Fig. 5.19 BER para CC $1/3$ para QPSK y BPSK

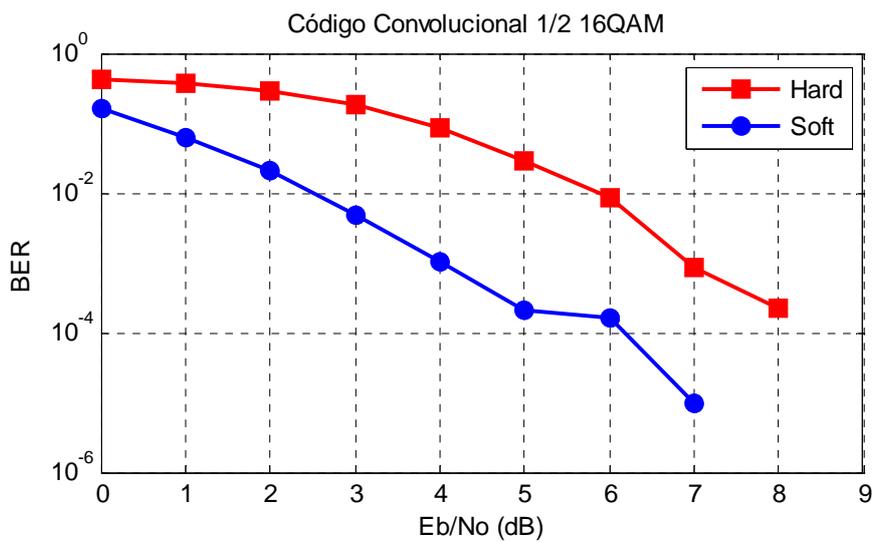


Fig. 5.20 BER para CC $1/3$ para 16QAM

Observaciones.

Como se muestra en la tabla 5.7, se ha mejorado alrededor de .3dB con respecto al CC anterior, lo que nos indica que debemos trabajar con polinomios completos y con la misma cantidad de factores.

BER	Modulación sin			CC 1/3 (9, [525 253 444]) SUAVE			CC 1/3 (9, [525 253 444]) DURA		
	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM	BPSK	QPSK	16QAM
1E-6	10.5dB	10.5dB	15dB	5dB	5dB	7.8dB	7.2dB	7.2dB	11dB

Tabla 5.7 SNR respecto a BER 1E-6 con CC 1/3 (9, [525 253 444])

5.4 Conclusiones.

Con base al análisis teórico y las simulaciones hechas para modelar el BER en un enlace con ruido aditivo gaussiano, con técnica de modulación BPSK, QPSK y 16QAM pudimos obtener resultados extremadamente parecidos, con una desviación menor al 3%.

Las pruebas que se hicieron tienen una tendencia pseudo aleatoria ya que no se encontraron las suficientes referencias para el modelado de códigos convolucionales, que tuvieran las tablas que simulen estas.

Esta parte de la tesis fue la más importante ya que reúne todo el trabajo para mostrar los elementos de mayor importancia a ser considerados cuando se pretende dar mejoras en la calidad del servicio, involucradas con el BER.

En cada simulación podemos observar la influencia de los códigos convolucionales ya sea que tengan un tasa de codificación 1/2 o 1/3, y ver los beneficios que se generan al poder recibir la señal de manera correcta cuando se cumplen las condiciones de BER mínimas.

Se encontraron varias tendencias como lo son:

Una tasa de codificación de 1/2 es beneficiosa para transmitir la señal en una portadora QPSK y BPSK, aunque se puede adaptar a 16QAM no es lo más indicado.

Los resultados obtenidos para una tasa de codificación de $1/3$ tienen una mejoría cuando se trabaja con modulación 16QAM.

Así que si se como propuesta esta la de crear un sistema que diferencie entre varias técnicas de modulación y que tenga la capacidad de adaptarse según la SNR a un código convolucional adecuado, que para estas pruebas queda: BPSK y QPSK con CC $1/2$ y mas adecuado con 6 registros. Para las tres modulaciones se puede usar CC $1/2$ pero con 8 registros. Y en caso que se tenga una modulación de mayor orden como lo es 16QAM o MQAM se propone el uso de CC de $1/3$, ya que como se mostró en todas las simulaciones anteriores tiene una fuerte tendencia a corregir los errores cuando existen problemas en la transmisión, aunado a esto WiMax recomienda dentro de su modulación adaptativa que estas modulaciones se utilicen para transmisiones con un alto throughput.

Sin embargo faltan muchos códigos convolucionales por probar de manera que se encuentren los más eficientes y pueda ser tomado como referencia para trabajos futuros, adaptándose a las necesidades actuales y siempre previendo el crecimiento de las redes de banda ancha.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 Discusiones Finales

Si bien el modelo propuesto de la capa física para una red BWA con modulación BPSK, QPSK y 16QAM, que trabaja con un código corrector llamado códigos convolucionales, mejora considerablemente la eficiencia y por tanto en la calidad en la transmisión de datos.

Aún existen mejoras que se pueden hacer creando nuevas combinaciones en los códigos convolucionales de manera que se puedan adaptar al tipo de modulación y ambiente que exista.

En nuestro caso se busca predecir los errores de manera que puedan ser corregidos, pero no se ha buscado crear un sistema de petición en dado caso que el error ya se haya detectado. Y con esto adaptar al sistema para que evite ráfagas de errores que no han sido previstos.

Por otro lado los resultados obtenidos se apegan a los resultados teóricos los cuales fueron la base para elaborar el sistema, aunque debido a la variedad de escenarios que se presentaron es difícil encontrar los cálculos teóricos cuando se trata de códigos convolucionales, así que la idea de crear este modelo es prever el comportamiento del enlace cuando se aplican códigos convolucionales, y establecer los códigos óptimos basados en experimentos y en polinomios que busquen cubrir la mayor cantidad de errores que pueden ser detectados en una red.

La creación de un simulador BER y otros proyectos relacionados al modelado de redes, permite establecer criterios para obtener la viabilidad de que un proyecto pueda o no ser construido físicamente y con esto poder introducirse dentro el mercado como una solución a las necesidades en la comunicación.

6.2 Trabajo Futuro

La capa física de una red BWA ha estado en continua evolución, creándose y proponiéndose cambios constantes para satisfacer la demanda de los usuarios y poder establecer una comunicación con alta eficiencia.

Nuestro modelo sólo contempla la modulación BPSK, QPSK y 16QAM por lo que se pueden agregar otro tipo de modulaciones como 64QAM entre otras estableciendo velocidades de transmisión mayores e integrándolo dentro de una modulación adaptativa, que pueda usar múltiples portadoras para aumentar la capacidad del canal y que pueda establecer como referencia el bit error rate para la transmisión adecuada según la SNR entre la estación base y la estación suscriptora. Y en caso de una arquitectura MESH la mejor opción para transmitir de una estación suscriptora hacia otra estación suscriptora.

Se deben crear distintos escenarios a fin de conocer el comportamiento dinámico de la red, cambiando la profundidad de los códigos convolucionales,

así como sus polinomios característicos. Alternativo a esto proponer nuevos códigos que sean capaces de adaptarse a los escenarios es decir darle ciertos valores a los servicios de manera que si un codificador necesita de más operaciones para asegurar una corrección correcta entonces se deberán poner tiempos preámbulo para establecer sincronía entre los usuarios.

Establecer relaciones entre los códigos ya creados de manera que puedan complementarse entre si, asegurando que la información viaje en un entorno lo suficientemente seguro para que no existan pérdidas en los datos, algunos de estos códigos que deben ponerse a prueba son los de bloque, el código Reed Solomon, Codificador Turbo [9].

Como se observó en la figura 4.1 en el sistema de comunicación digital para OFDM tiene varios módulos los cuales no fueron implementados dentro de nuestro modelo y que son necesarios para aumentar la seguridad y la calidad de la información ante distintos escenarios.

Esta el bloque aleatorizador que una vez agregado nos permitirá hacer una distribución de la energía de los datos sobre el espectro disponible. Se puede agregar el modulo intercalador que nos permitirá distribuir la información en bits de diferentes tramas dentro de una misma trama común, con esto se minimizó las ráfagas de error sobre todo en escenarios multitrayectoria.

Es necesario crear códigos que puedan aprender del sistema, observando cuales son los errores más comunes y corrigiéndolos de manera que no se tengan que agregar encabezados, que implica gran cantidad de información.

6.3 Contribuciones

La principal contribución fue haber creado un modelo que es capaz de obtener el BER, para distintas técnicas de modulación y diferentes C.C., de manera que se puedan hacer más pruebas e investigaciones en el comportamiento de estos C.C. y como se dijo en la sección anterior hacer un modelado más robusto.

Para un enlace sin C.C. la cantidad de errores que existían en relación a la SNR. fue bastante superior en comparación al BER cuando se usan C.C.

Se contribuye con un C.C. el cual se basó en la media de dos C.C.'s uno de 8 registros y otros de 5 registros, proponiendo para ello el de 6 registros y con dos polinomios los cuales se basaron en las características propias de cada uno de los C.C., obteniendo como resultado un C.C. capaz de adaptarse a cualquier tipo de modulación.

Se ha propuesto que se use una modulación que se adapte a las condiciones propias del ambiente, de manera que cuando se registren ciertos sucesos o fenómenos, la estación base sea capaz de adaptarse a estos fenómenos cambiando su modulación y su técnica de corrección.

La manera propuesta es: en el caso de que se use modulación BPSK o QPSK el sistema debería usar un C.C. de menor tasa de codificación en nuestro caso 1/2, debido a que estas señales presentan "poca" susceptibilidad al ruido, pero

tienen el desfortunio de transmitir pocos bits por frecuencia, es decir su velocidad es menor en comparación a una modulación de mayor orden.

Se ha considerado un C.C. de 1/3 y con más registros para una modulación de orden superior como lo es 16QAM, ya que los puntos en su constelación están lo suficientemente pegados y son susceptibles a tener mucho ruido, ya sea por el mismo canal, o por la interferencia intersimbólica.

6.4 Conclusiones Finales

En este proyecto nos vimos intrínsecamente relacionados con el modelado de la capa física, observando cuales son las características principales que se deben tomar en cuenta cuando se traba en la capa física. Pudimos modelar las diferentes técnicas de modulación BPSK, QPSK y 16QAM observando su distribución y las palabras códigos que deben ser generadas en cada una de estas cuando se desea transmitir, sus características principales y las ventajas que implementar estas modulaciones acarrea. Como lo es una velocidad de transmisión mayor para el caso de modulación con un código de palabra mayor, y que sin embargo tiene gran susceptibilidad al ruido por lo que se recomienda que estas trabajen en distancias cortas. Para BPSK y QPSK se concluyo que son bastante efectivas ya que no tienen tanta interferencia y no se necesita de un C.C. lo suficientemente robusto para corregir errores.

Por otro lado estuvo la etapa de corrección de errores, en donde pudimos observar el comportamiento de estos cuando se usan distintas técnicas de modulación y finalmente la señal atraviesa un canal con ruido aditivo gaussiano. Pudiendo establecer las ventajas cuando se establece un C.C. lo bastante adaptable según la naturaleza propia de la modulación.

Dentro de los parámetros mas importantes al modelar la capa física y obtener el BER están los siguientes.

- El periodo de la señal.
- El tamaño de los paquetes a transmitir.
- El tipo de C.C. que se desea probar.
- La distribución del ruido gaussiano
- El tipo de decisión que se debe tomar al recibir la señal, es decir suave o fuerte.
- El tipo de modulación que se quiere simular.
- La sincronización de los datos

Se establecieron los bloques que quedan por agregar para continuar con el modelado de la capa física, y así obtener un sistema más robusto el cual puede obtener parámetros tan importantes como el periodo de latencia, el throughput, el número de usuarios, entre otros.

Referencias

- [1] Soporte de QoS en Redes de 4a Generación, Carlos García, Antonio Cuevas, José Ignacio Moreno, Member IEEE
- [2] An Adaptive Modulation Scheme for Simultaneous Voice and Data Transmission over Fading Channels. Mohamed-Slim Alouini, Member IEEE, Xiaoyi Tang and Andrea J. Goldsmith, Member IEEE.
- [3] QAM based adaptive modulation for OFDM-CDMA wireless networks, Wasantha, M.K.; Fernando, W.A.C.
- [4] Adaptive modulation based MC-CDMA systems for 4G wireless consumer applications, Chatterjee, S.; Fernando, W.A.C.; Wasantha, M.K.;
- [5] A New Analytical Approach to Evaluation of Packet Error Rate in Wireless Networks, Ramin Khalili and Kavé Salamatian, Université Pierre et Marie Curie, Members IEEE
- [6] On the distribution of error in convolutional codes, Ramin Khalili and Kavé Salamatian, Université Pierre et Marie Curie, Members IEEE
- [7] International Telecommunication Union
- [8] Trends and Challenges in Broadband Wireless Access; Hikmet Sari.
- [9] WiMAX Forum.
- [10] Broadband Radio Access Networks (BRAN), HIPERACCESS-System Overview. 2002.
- [11] Broadband Wireless Access; Walter Honcharenko, Jan P. Kruys, et al
- [12] The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards

WebSites

Bandas no licenciadas. <http://www.itu.int/publications/publications.aspx?lang=en&parent=R-QUE-SG01.217&folder=R-QUE-SG01.217-1998>

Bluetooth <http://www.ieee802.org>

WiFi <http://www.ieee802.org/11/>

HomeRF www.palowireless.com/homerf/homerf2.asp

Ultra Wide Band <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-wideband>

Apéndice A

Programación

Código para empezar la simulación pasa los parámetros a los módulos

```
modelName = 'solqam';
open_system(modelName);
EbNo      = 0:20;      % Eb/No en dB
codeRate  = 1/2;      % code rate del codigo convolucional
nBits     = 4;        % numero de bits en nuestro caso 4 para 16qam
Pavg      = 1;        % potencia promedio
snr       = EbNo - 10*log10(1/codeRate) + 10*log10(nBits);
% SNR in dB
noiseVarVector = Pavg ./ (10.^(snr./10)); % varianza ruido
polino=poly2trellis(9, [525 253 444]);

ber_HD     = zeros(1, length(EbNo));
ber_LLRLR  = zeros(1, length(EbNo));

% Computo del BER
for idx=1:length(noiseVarVector)
    noiseVar = noiseVarVector(idx);
    sim(modelName);
    %salida de variabñes
    ber_HD(idx) = BER_HD(1);
    ber_soft(idx) = BER_soft(1);
end

semilogy(EbNo, ber_HD, 'r*', ...
    EbNo, ber_LLRLR, 'b*');
legend('Hard','Soft');
xlabel('Eb/No (dB)'); ylabel('BER');
title('Código Convolucional 1/2 16QAM ');
grid on;
```

Función que nos permite graficar los datos obtenidos

```
semilogy(ebno0,ber0,'--r^');

hold on;

xlabel('E_b/N_0 (dB)');
ylabel('Bit Error Rate ');

drawnow;

legend('Hard');
grid on;
```

Función que nos permite obtener el bit error rate

```
close all;
EbNo = [0:18];
```

```

[berpsk2, serpsk2] = berawgn(EbNo,'psk',2,'nondiff');
[berpsk4, serpsk4] = berawgn(EbNo,'psk',4,'nondiff');
[berqam16, serqam16] = berawgn(EbNo,'qam',16);

figure;
%axis('auto');
axis([0,18, 0.000001,1]);
semilogy(EbNo,serpsk2,'c');
hold on;
semilogy(EbNo,serpsk4,'r');
hold on;
semilogy(EbNo,serqam16,'y');
hold on;
xlabel('E_b/N_0 (dB)');
ylabel('Symbol Error Rate');

drawnow;

legend('BPSK','QPSK','QAM');
grid on;
hold off;

%función que nos calcula el Symbol Error Rate
function ber16qam
clc
close all
title ('BER vs Eb/No')
xlabel('Eb/No')
ylabel('BER')
for EbNo=0:.01:17
[berqam,serqam] = berawgn(EbNo,'qam',16);
[ber2psk,ser2psk] = berawgn(EbNo,'psk',2,'nondiff');
[ber4psk,ser4psk] = berawgn(EbNo,'psk',4,'nondiff');
EbNo;

axis ('auto')
grid on
hold on
%stem(EbNo,ber2psk)
%figure
%plot (EbNo,ber)

%plot (EbNo,serqam,'y')
plot (EbNo,berqam,'y-')
%plot (EbNo,ser,'y>')
plot (EbNo,ber2psk,'c-')
plot (EbNo,ber4psk,'r-')
%semilogy (EbNo,ber2psk,'r*')
end
Función que se usa para el calculo de PER

close all;
bytes=8;
bits=bytes*8;
EbNo = [0:16];
[berpsk2, serpsk2] = berawgn(EbNo,'psk',2,'nondiff');
[berpsk4, serpsk4] = berawgn(EbNo,'psk',4,'nondiff');

```

```

[berqam16, serqam16] = berawgn(EbNo,'qam',16);

figure;
axis('auto');
perpsk2=1-(1-berpsk2).^bits;
semilogy(EbNo,perpsk2,'c');
hold on;
perpsk4=1-(1-berpsk4).^bits;
semilogy(EbNo,perpsk4,'r');
hold on;
perqam16=1-(1-berqam16).^bits;
semilogy(EbNo,perqam16,'y');
hold on;
xlabel('E_b/N_0 (dB)');
ylabel('Packet Error Rate ');

drawnow;

legend('BPSK','QPSK','QAM');
grid on;
hold off;

figure;
axis('auto');
%axis([0,18, 0.000001,1]);
perpsk2=(1-berpsk2).^bits;
semilogy(EbNo,perpsk2,'c');
hold on;
perpsk4=(1-berpsk4).^bits;
semilogy(EbNo,perpsk4,'r');
hold on;
perqam16=(1-berqam16).^bits;
semilogy(EbNo,perqam16,'y');
hold on;
xlabel('E_b/N_0 (dB)');
ylabel('Probabilidad de transmitir el paquete con exito');
legend('BPSK','QPSK','QAM');
grid on;
hold off;

drawnow;

```

Apéndice B

Acrónimos y Abreviaturas

BER	Bit Error Rate
BRAN	Broadband Radio Access Networks
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
CDMA	Code Division Multiple Access
CRC	Cyclic Redundancy Check
DL	Downlink
DL-MAP	Downlink Map
DSL	Digital Subscriber Line
FEC	Forward Error Correction
FSK	Frequency Shift Keying
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
HIPERLAN	(High Performance Radio Local Area Networks)
IDU	Indoor Unit
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IMT200	International Mobile Telecommunication 2000
ITU	International Telecommunications Union
LMCS	Local Multipoint Communication Systems
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LOS	Line of Sight
MAC	Media Access Control
ODU	Outdoor Unit
OFDM	(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OFDMA	(Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access)
PSK	(Phase Shift Keying)
QAM	(Quadrature Amplitude Modulation)
QoS	(Quality of service)
QPSK	(Quadrature Phase Shift Keying)
SS	Subscriber Station
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
UL-MAP	Uplink Map
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network