



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: “ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL DESEMPEÑO DE
OFDM EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE GUARDA EN CANALES
CON DESVANECIMIENTO SELECTIVO EN FRECUENCIA”**

AUTOR: LÓPEZ CORTEZ, CHRISTIAN SANTIAGO

DIRECTOR: DR. GONZALO OLMEDO

CODIRECTOR: ING. RUBÉN LEÓN

SANGOLQUÍ

2015

Certificado de tutoría

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICADO

Ing. Gonzalo Olmedo PhD.

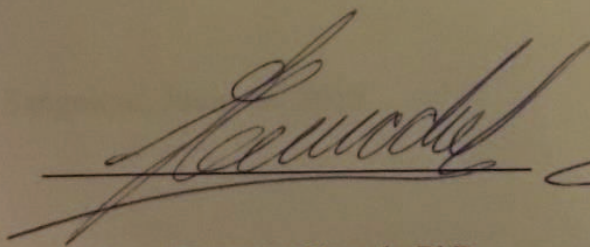
Ing. Rubén León.

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado "ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL DESEMPEÑO DE OFDM EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE GUARDA EN CANALES CON DESVANECIMIENTO SELECTIVO EN FRECUENCIA", realizado por Christian Santiago López Cortez, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en su reglamento.

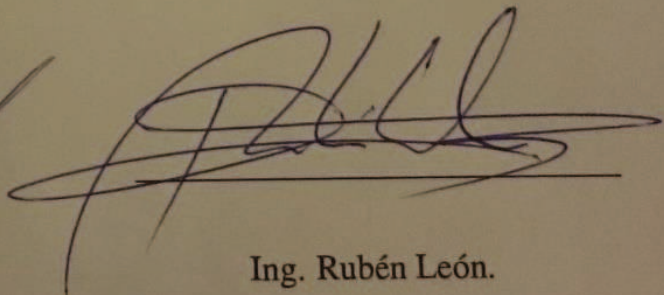
Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

Sangolquí, Junio de 2015.



Ing. Gonzalo Olmedo PhD.

DIRECTOR



Ing. Rubén León.

CODIRECTOR

Declaración de Responsabilidad

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

CHRISTIAN SANTIAGO LÓPEZ CORTEZ

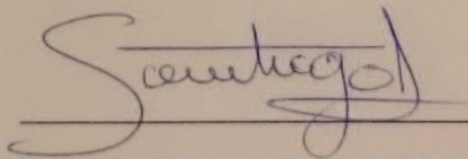
DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado "ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL DESEMPEÑO DE OFDM EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE GUARDA EN CANALES CON DESVANECIMIENTO SELECTIVO EN FRECUENCIA", ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Junio del 2015.



Christian Santiago López Cortez.

Autorización de publicación

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

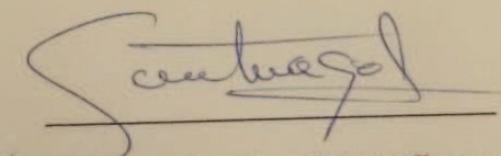
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

CHRISTIAN SANTIAGO LÓPEZ CORTEZ

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo "ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL DESEMPEÑO DE OFDM EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE GUARDA EN CANALES CON DESVANECIMIENTO SELECTIVO EN FRECUENCIA", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Sangolquí, Mayo del 2015.



Christian Santiago López Cortez

DEDICATORIA

A mis padres y a mi fiel compañera.

Santiago Lopez Cortez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, que de una u otra manera estuvo presente para ayudarme a seguir adelante, incluyendo a mis tías, hermana, primos y en especial a mis padres.

Agradezco también a todos los profesores que supieron dejarme una enseñanza positiva a lo largo de todos los años en la universidad, en especial al director de tesis, a mis amigos y al grupo TM3.

Agradezco finalmente a Fabiana, por todo su apoyo y amor para finalizar este paso y comenzar uno nuevo.

Santiago López Cortez

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Justificación e importancia	6
1.4 Alcance del Proyecto	8
1.5 Objetivos	8
1.5.1 General	8
1.5.2 Específicos	8
1.6 Organización de la Memoria	9
2 MARCO TEÓRICO	10

2.1	Canal inalámbrico	10
2.1.1	Múltiples trayectos	11
2.1.2	El canal Gaussiano	13
2.1.3	El canal Rayleigh	14
2.1.4	El canal Rice	16
2.2	Multiplexación por división ortogonal en frecuencia (OFDM)	18
2.2.1	Sistema general de OFDM	19
2.2.2	Uso de la FFT en OFDM	21
2.2.3	Transmisor y Receptor OFDM	22
2.2.4	Tiempo de Guarda y prefijo cíclico	24
2.2.5	Ventajas de OFDM	25
2.3	Sistema de Televisión Digital ISDB-tb	26
3	SIMULADOR DEL SISTEMA DE TELECOMUNICACIONES CON TÉCNICA OFDM	30
3.1	Herramientas de desarrollo	30
3.2	Estructura del Simulador	31
3.2.1	Transmisor OFDM	31
3.2.2	Canal inalámbrico	33
3.2.3	Receptor OFDM	34
4	EVALUACIÓN DEL SISTEMA OFDM	36
4.1	Definición de los parámetros del sistemas	36
4.1.1	Valores de los parámetros usados en el transmisor y receptor	36
4.1.2	Valores de los parámetros usados en el canal inalámbrico	40
4.2	Resultados de las pruebas	41
4.3	Análisis de Resultados	47
5	DISCUSIÓN	49

5.1 Conclusiones	49
5.2 Recomendaciones	51
5.3 Trabajo Futuro	51
BIBLIOGRAFÍA	52

ÍNDICE DE TABLAS

1	Modos de transmisión	29
2	Relación de distancias de los trayectos	40

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Las 3 subportadoras ortogonales permiten traslape de sus espectros sin interferencia	2
2	Modulación OFDM realizada en RF con 8 subportadoras	3
3	Escenario de propagación por múltiples trayectos	7
4	Múltiples trayectos en una zona urbana	11
5	Canal gaussiano	13
6	Función de densidad de probabilidad Gaussiano	14
7	Función de densidad de probabilidad Rayleigh	15
8	Función de densidad de probabilidad Rayleigh con distintos valores de σ	15
9	PDF normalizada a sus promedios locales	16
10	Función de transferencia del canal modelado	17
11	Comparación entre Single Carrier y Multicarrier	19
12	Modelo de un sistema OFDM simple	20
13	Intervalo de guarda	24
14	El prefijo cíclico	25
15	Modelo de Transmisión	27
16	Formación del cuadro OFDM	28
17	Diagrama de bloques de un TX y RX de un sistema OFDM	31
18	Modulación QPSK	37

19	Modulación 16QAM	38
20	Modulación 64QAM	38
21	Frecuencias ortogonales	39
22	Frecuencias ortogonales	41
23	Curva de BER con sistema OFDM y modulación QPSK	42
24	Curva de BER con sistema OFDM y modulación 16QAM	42
25	Curva de BER con sistema OFDM y modulación 64QAM	43
26	Curva de BER con sistema OFDM y canal Rayleigh	43
27	Curva de BER con sistema OFDM y canal Rician	44
28	Curva de BER con sistema OFDM y canal Rayleigh	44
29	Curva de BER con sistema OFDM y canal Rician	45
30	Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 1/2	45
31	Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 2/3	46
32	Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 3/4	46
33	Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 5/6	47
34	Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 7/8	47
35	Relación de la potencia de señal recibida y tiempo de guarda	48

RESUMEN

En las últimas décadas se ha desarrollado técnicas para transmitir información a largas distancias, lo que ha producido cambios muy significativos en la vida cotidiana de las personas; todo esto mediante el uso de las redes inalámbricas. El principal inconveniente es el desvanecimiento causado por la propagación de múltiples trayectos, producido por obstáculos, especialmente en ciudades y pueblos; ya que tienen un sin número de edificios, vehículos, personas, etc. La mejor técnica actualmente conocida y utilizada para combatir este problema es la multiplexación ortogonal por división de frecuencia, por sus siglas en inglés (*OFDM*). Muchos estudios actuales se enfocan en la técnica del sistema OFDM como tal, tomando poco o casi nada en cuenta el análisis del tiempo de guarda. En este proyecto se pretende realizar el análisis de este tiempo, mediante la simulación de la capa física de televisión digital ISDB-tb para movilidad, donde se encuentra este canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia.

Palabras clave: TIEMPO DE GUARDA, DESVANECIMIENTO SELECTIVO EN FRECUENCIA, OFDM.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En los últimos años se ha generado un gran desarrollo de las telecomunicaciones con el fin de que un sin número de personas alcance una gran cantidad de información, pero el desafío es que este llegue de manera casi instantánea y a cualquier parte del mundo. Uno de los grandes problemas que enfrenta las telecomunicaciones, es el medio por donde viaja la información, es decir las ondas electromagnéticas, ya que estas ondas deben atravesar un sin número de obstáculos, como por ejemplo montañas, edificios, personas, etc., ocasionando desvanecimiento, interferencia intercanal (ICI) e interferencia intersimbólica (ISI).

Actualmente, una de las mejoras técnicas para aumentar la velocidad de transferencia máxima es la Multiplexación Ortogonal por División de Frecuencia, o por sus siglas en inglés, (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing), ya que transmite mensajes simultáneos a través de un canal limitado, ya que lo divide en un número determinado de bandas de frecuencia equiespaciadas, y en cada banda se transmite una subportadora que transporta una porción de la información. Cada subportadora es ortogonal a las demás, dándole el nombre a esta técnica de multiplexación por división

de frecuencia. El uso de la transformada rápida de Fourier, o por sus siglas en inglés, FFT, en la modulación y demodulación en banda base, aumentó la eficiencia de procesamiento, ya que eliminó los bancos de osciladores de las subportadoras. Y para combatir la ICI y la ISI se usa un tiempo de guarda entre los símbolos OFDM.

OFDM es una técnica basada en la multiplexación por división de frecuencia y cada subportadora es ortogonal al resto permitiendo que el espectro de cada una estén traslapadas y no exista interferencia, como se puede ver en la figura 1. Esta característica permite el uso eficiente del espectro ya que no se utiliza bandas de separación entre subportadoras.

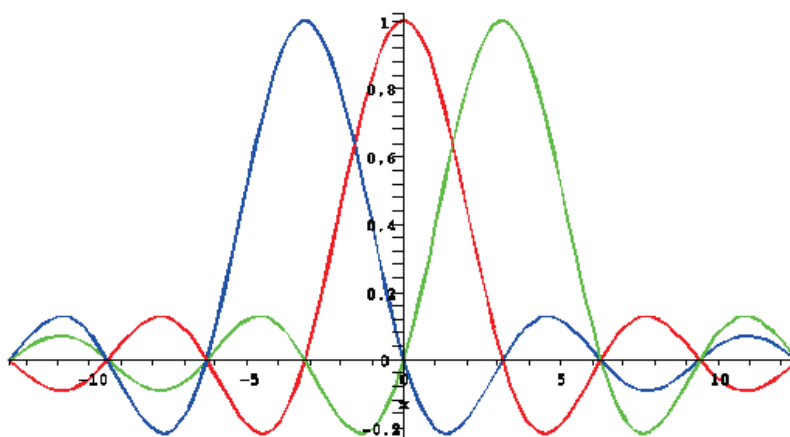


Figura 1: Las 3 subportadoras ortogonales permiten traslape de sus espectros sin interferencia

A partir de las ventajas de OFDM se desea realizar un análisis matemático para establecer el mejor tiempo de guarda en comparación con el terreno, logrando de esta forma optimizar esta técnica.

La técnica OFDM es usada en la televisión digital terrestre, radio digital, en redes de área local en el protocolo IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, IEEE

802.11ac y IEEE 802.11ad [1], 3GPP release 8 y 9 conocido como LTE (*Long Term Evolution*) y release 10 o LTE-Advanced [1] y WiMAX [1]. OFDM fue introducida en los años sesenta para usarse en radios militares de alta frecuencia, pero su aplicación comenzó cuando la transformada discreta de Fourier y su inversión aparecieron, dando lugar a su viabilidad [1].

1.2 Antecedentes

El origen de la técnica de OFDM se remonta a la década de los 50s y 60s, siendo este de uso militar en radios de alta frecuencia donde se trabajaba dividiendo el espectro disponible en múltiples subportadoras, realizada totalmente en la etapa de radiofrecuencia. En la figura 2 se observa un esquema de lo que sería una implementación de OFDM con apenas 8 frecuencias ortogonales, realizada totalmente en la etapa de radiofrecuencia (RF). Se observa la dependencia del sistema de la precisión de cada oscilador y demás elementos que pueden introducir espurias como mixers y divisores, y debemos contar con las no linealidades de filtros y amplificadores que suponen una demodulación coherente en el receptor.

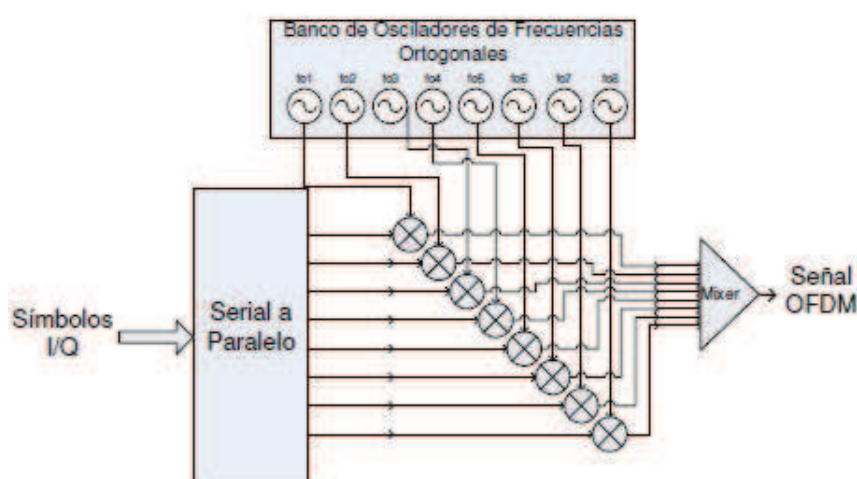


Figura 2: Modulación OFDM realizada en RF con 8 subportadoras

La transformada discreta de Fourier (DFT) y su inversa (iDFT) son los métodos que le dieron viabilidad a OFDM, ya que reemplazaron los bancos de osciladores y la inmensa circuitería de RF. El uso de estos algoritmos significa pasar el trabajo a una etapa de procesamiento digital de señales. Por eso la implementación pudo hacerse efectiva con los avances en dispositivos de muy larga escala de integración (VLSI) y el desarrollo de los algoritmos de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) [2].

Pero fue en 1971 en que Weinstein y Ebert introdujeron la iFFT/FFT para OFDM junto con el concepto de intervalo de guarda para evitar la interferencia intersimbólica (ISI) y la interferencia intercanal (ICI) [3].

En la siguiente lista se puede ver el detallado del proceso histórico de OFDM en aplicaciones inalámbricas:

1. 1957 Kineplex, multi-carrier high frequency (HF) MODEM.
2. 1966 R. W. Chang, Bell Labs, OFDM paper + patente.
3. 1971 Weinstein y Ebert proponen el uso de la FFT y el intervalo de guarda.
4. 1985 Cimini describió el uso de OFDM para comunicaciones móviles.
5. 1985 MODEM Telebit Trailblazer fue incorporado usando un protocolo de ensamblaje de paquetes de 512 portadoras.
6. 1987 AlardLasalle propone OFDM para difusión digital.
7. 1988 TH-CSF LER, primer enlace experimental de TV Digital con OFDM, Área de París.
8. 1993 Morris: OFDM de 150Mbit/s wireless LAN experimental.
9. 1995 La ETSI establece el primer estándar basado en OFDM, el DAB.

10. 1997 El Estándar DVT-T fue adoptado.
11. 1997 Se emplea en difusión de Internet con Linea de Suscriptor Digital Asimétrica (ADSL).
12. 1998 El proyecto Magic WAND demostró módems OFDM para W-LAN.
13. 1999 Los estándares IEEE 802.11a (WiFi) e HIPERLAN/2 son establecidos para W-LAN.
14. 2000 Vector-OFDM (V-OFDM) para acceso fijo inalámbrico y otros estándares propietarios como FLASH-OFDM.
15. 1997 Se emplea en difusión de Internet con Linea de Suscriptor Digital Asimétrica (ADSL).
16. 1998 El proyecto Magic WAND demostró módems OFDM para W-LAN
17. 1999 Los estándares IEEE 802.11a (WiFi) e HIPERLAN/2 son establecidos para W-LAN.
18. 2000: Vector-OFDM (V-OFDM) para acceso fijo inalámbrico y otros estándares propietarios como FLASH-OFDM.
19. 2002: En estándar IEEE 802.11g para redes inalámbricas LAN.
20. 2004: En estándar IEEE 802.16 para redes inalámbricas MAN (WiMAX).
21. 2004: En estándar ETSI DVB-H.
22. 2004: Candidato para el estándar IEEE 802.15.3a de redes inalámbricas PAN (MB-OFDM).
23. 2004: Candidato para el estándar IEEE 802.11n para la siguiente generación de redes inalámbricas LAN

24. 2005: OFDMA es candidato para 3GPP Long Term Evolution (LTE) air interface E-UTRA downlink.
25. 2007: En el primer lanzamiento de LTE, se incluye OFDM-MIMO, SC-FDMA y multiusuario MIMO uplink.

1.3 Justificación e importancia

Las señales que viajan con información desde un transmisor hacia un receptor, deben cruzar un sin número de inconvenientes, esta es la razón por la cual la calidad del enlace varía. Cuando existe varios obstáculos, como: edificios, árboles, montañas, personas o vehículos, la señal transmitida choca contra ellos produciendo reflexiones, lo que ocasiona que varias señales reflejadas lleguen al receptor a diferentes tiempos, produciendo un desvanecimiento en la señal. A este cambio de la señal en el canal se denomina desvanecimiento selectivo en frecuencia o desvanecimiento por múltiples trayectos [4]. En la figura 3 se observa de manera clara, como una señal llega de forma directa (línea entrecortada) y varias reflejadas (línea continua) al receptor, aquí estas señales se suman provocando desvanecimiento.

Cuando la señal de comunicación se trasmite hacia el receptor, esta señal toma diferentes caminos hasta llega; esto produce un retraso de propagación mayor que el tamaño del símbolo OFDM, por lo tanto ocasiona un desvanecimiento selectivo en frecuencia. Los caminos que toman las señales pueden ser más largos o cortos, dando como resultado una señal atenuada, retrasada en el tiempo y distorsionada. Esto es una forma de auto interferencia que incrementa la tasa de errores en transmisión digital. Al incrementar la potencia de la portadora no se resuelve el problema, sino se incrementa este tipo de interferencia.

OFDM logra superar los problemas por múltiples trayectos debido a que es un esquema de multiplexación de banda ancha que transmite muchas señales digitales

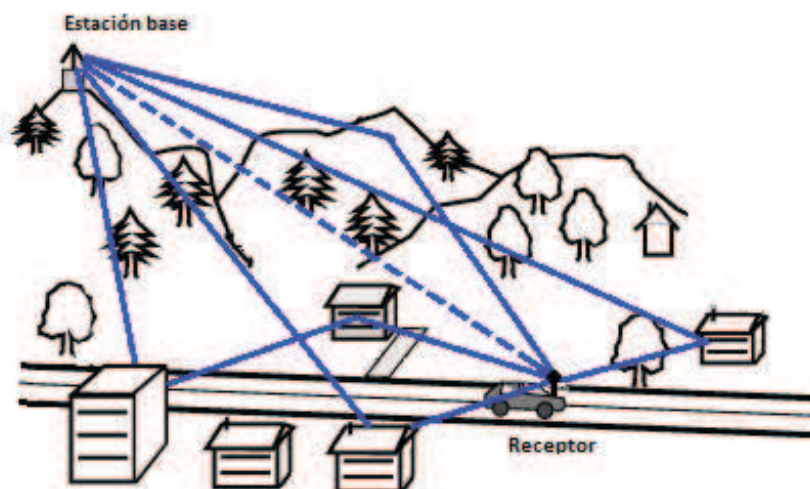


Figura 3: Escenario de propagación por múltiples trayectos

traslapadas de banda angosta en paralelo. Al aumentar el número de portadoras, se reduce la tasa de transmisión y se aumenta el periodo del símbolo, produciendo que el tiempo de retraso de las ondas reflejadas esté en cada tiempo de símbolo [5].

La principal ventaja de OFDM frente a otros sistemas de comunicación es que puede superar la degradación que sufre la señal al tener varios trayectos, lo cual lo vuelve confiable, alcanzando altas velocidades de transmisión.

La televisión digital terrestre utiliza OFDM para evitar los múltiples trayectos ocasionados por los obstáculos, especialmente en las ciudades. El estudio de basa en el análisis del tiempo de guarda mínimo que se debe utilizar para garantizar el envío correcto de la información, optimizando la velocidad de transmisión y especialmente en canales móviles, al momento de usar el servicio de audio y video digital en equipos móviles.

1.4 Alcance del Proyecto

El presente proyecto tiene como fin modelar el tiempo de guarda de la capa física del sistema de Televisión Digital Terrestre, en ISDB-Tb mediante la herramienta MATLAB para determinar las mejores soluciones para distintos ambientes de propagación y evidenciar el mejor desempeño de la técnica de OFDM mediante el análisis del tiempo de guarda.

Ademas, se pretende simular un canal con desvanecimiento por múltiples trayectos no sincronizados para adaptar un correcto tiempo de guarda, y de esta manera utilizar un adecuado prefijo cíclico y representar un adecuado sistema de comunicación donde se utilice la técnica OFDM mediante bits aleatorios para obtener la tasa de error.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

- Realizar un análisis matemático de OFDM en función del tiempo de guarda en canales con desvanecimiento selectivo en frecuencia.

1.5.2 Específicos

- Simular un sistema de comunicación que utiliza la técnica OFDM y con un canal con desvanecimiento por múltiples trayectos.
- Modelar el canal con las variables de desvanecimiento selectivo en frecuencia.
- Establecer los tiempos no sincronizados de los múltiples trayectos.
- Variar la relación señal a ruido para obtener la curva de BER del sistema de comunicación.

- Llegar a una solución matemática para determinar la relación del tiempo de guarda y del desvanecimiento de los múltiples trayectos.

1.6 Organización de la Memoria

El presente trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: En el Capítulo 2 se encuentra el fundamento teórico de la investigación del canal inalámbrico y de la Multiplexación por división ortogonal en frecuencia (OFDM). En el Capítulo 3 se podrá verificar el desarrollo del simulador del sistema OFDM diseñado y del canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia. En el Capítulo 4 se realizará diferentes pruebas del simulador con distintos parámetros del canal, transmisor y receptor OFDM, verificando su correcto funcionamiento. En el capítulo 5 se visualizarán las conclusiones y recomendaciones del análisis realizado.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Canal inalámbrico

En un sistema de telecomunicaciones esta priorizado por el canal inalámbrico. O- puesto al medio alámbrico, que es estático y tiene características predecibles; el medio inalámbrico es dinámico, ya que ocasiona la obtención difícil de análisis exactos. Hace algunos años, se ha vuelto crítica la optimización de sistemas con medio inalámbricos, debido al gran crecimiento de servicios móviles que tienen acceso a Internet. Pero a pesar de todo, el medio inalámbrico brinda los beneficios de la capacidad de movilidad, el acceso desde mayor número de lugares y la facilidad de instalación, dependiendo de la velocidad y nivel de complejidad del tipo de servicio que se brinda al usuario.

Uno de los principales problemas que presenta y afectan el buen desempeño de los sistemas de comunicaciones es la interferencia entre símbolos (ISI) causado por el ancho de banda limitado de los canales y la propagación multitrayectoria en los canales inalámbricos.

2.1.1 Múltiples trayectos

El modelado matemático del canal es importante ya que proporciona una predicción más precisa del rendimiento del sistema de comunicación y provee el mecanismo para evaluar técnicas de mitigación de efectos negativos introducidos por el canal. Estas técnicas que sirven para obtener las predicciones de la intensidad de la señal en áreas urbanas, son de importancia dado que la mayoría de sistemas de comunicación están en ciudades o áreas muy pobladas, como se puede ver en la figura 4. El mayor problema en las áreas de edificios es ocasionado debido a que la antena móvil se encuentra por debajo de los edificios que la rodean, lo que ocasiona que no exista línea de vista con el transmisor. De esta forma, la propagación se da a través de dispersión y difracción de la señal en los edificios [6].

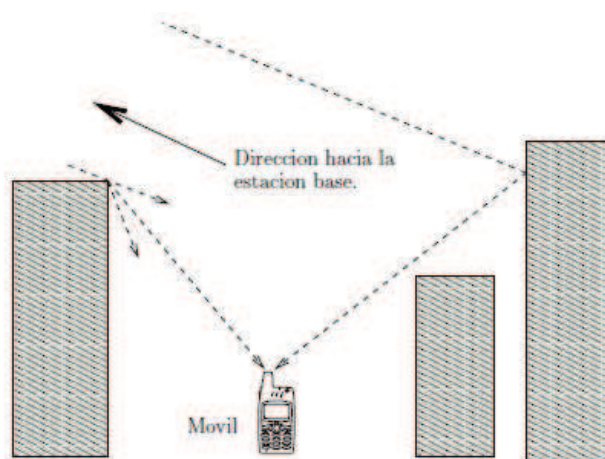


Figura 4: Múltiples trayectos en una zona urbana

La propagación de las ondas por el medio inalámbrico sufre afectaciones debido a los obstáculos físicos, por lo tanto se produce reflexiones y refracciones, dando como resultado que estas ondas recorran distintos recorridos hasta alcanzar el receptor produciendo interferencia. Por lo tanto se puede decir que la señal recibida que viaja a través de un canal inalámbrico depende del medio, siendo la señal recibida una combinación de réplicas atenuadas, difractadas, reflejadas y refractadas de la señal original.

La propagación por multitrayectorias ocasiona distorsión en los sistemas analógicos y afecta severamente el desempeño de los sistemas digitales reduciendo las relaciones señal a ruido y señal a interferencia [6]. En general, la propagación multitrayectoria, además de ocasionar desvanecimientos también ocasiona un ensanchamiento de los pulsos debido a que las diferentes componentes llegan al receptor con retardos, si estos retardos son mayores comparados con la velocidad de transmisión se produce interferencia entre símbolos y por tanto distorsión de los pulsos [7].

Los efectos del canal inalámbrico se pueden clasificar en dos grupos: las características de los efectos a gran escala y los efectos a pequeña escala.

2.1.1.1 Características del desvanecimiento a Gran Escala

Este tipo de desvanecimiento a gran escala representa la atenuación de la potencia promedio de la señal, o las pérdidas por trayectoria debidas al desplazamiento sobre áreas grandes [8].

El desvanecimiento a gran escala principalmente es provocado por la reflexión, debido a grandes objetos, como montañas o edificios, y también la atenuación debido a la gran distancia entre receptor y transmisor

2.1.1.2 Características del desvanecimiento a Pequeña Escala

El desvanecimiento a pequeña escala se refiere a los cambios dramáticos en la amplitud y en la fase de la señal, como resultado de cambios en la distancia entre el transmisor y el receptor [8].

Este tipo de desvanecimiento es causado principalmente por interferencia sea esta constructiva o destructiva entre las varias señales que llegan al receptor con un pequeño tiempo de diferencia. Estas señales se llaman Señales de multitrayecto o *multipath* y

son cambiadas para tener una señal resultante en el receptor de mayor amplitud y fase.

2.1.2 El canal Gaussiano

El canal Gaussiano o canal con ruido aditivo blanco, por sus siglas en inglés (AWGN), es el canal más simple donde no existe multitrayectos y se agrega una fuente de ruido del tipo AWGN en el receptor, como indica la figura 5.

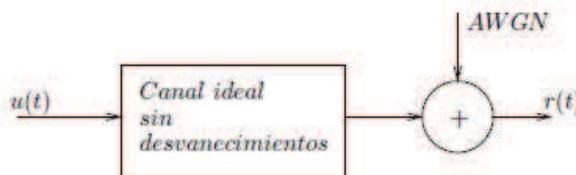


Figura 5: Canal gaussiano

Se asume que este ruido tiene una densidad espectral de potencia constante sobre todo el ancho de banda del canal y una función de densidad de probabilidad (PDF), por sus siglas en inglés, *Probability density function*, Gaussiana. En la figura 6, se puede ver las varias PDF con distintos valores de media (μ) y varianza (σ^2).

Este tipo de canal podría ser considerado como no realizable en comunicaciones inalámbricas, sin embargo no es así. Cuando se tienen microcélulas es posible tener una línea de vista, esencialmente sin multitrayectorias, dando un canal gaussiano. Incluso, cuando existe desvanecimiento por multitrayectorias, pero el móvil está estacionario y no existen otros objetos moviéndose, como vehículos en su vecindad, el canal móvil puede pensarse como un canal Gaussiano, representando los efectos del desvanecimiento por una trayectoria de pérdidas local [7].

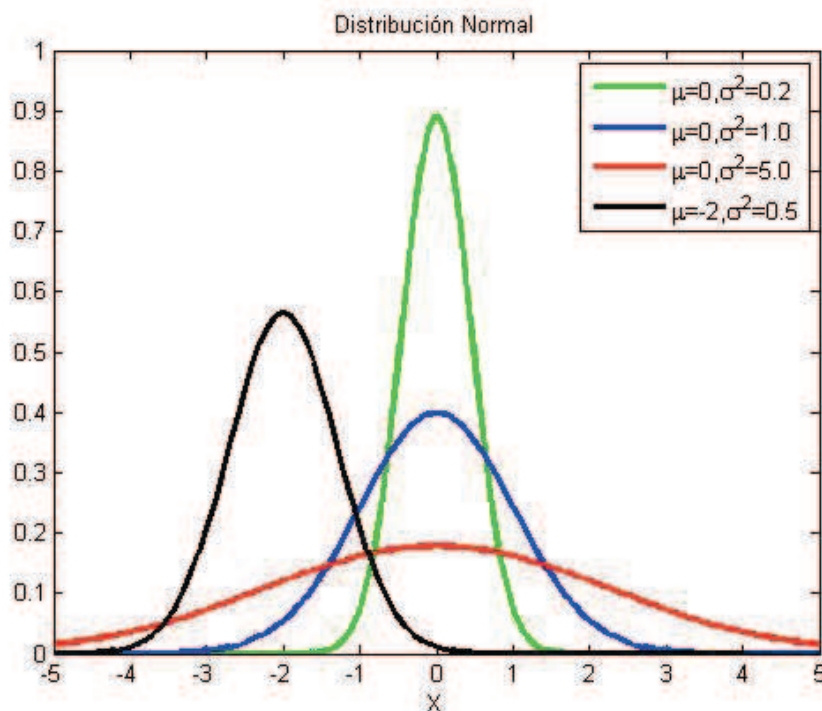


Figura 6: Función de densidad de probabilidad Gaussiano

2.1.3 El canal Rayleigh

Cuando existen desvanecimientos durante la transmisión, el canal de Rayleigh es una buena representación del tipo de canal de propagación [7], donde la mejor representación es la suma de dos señales Gaussiana, para formar el valor de σ .

Si cada componente multitrayectoria en la señal recibida es independiente, entonces la PDF de su envolvente es del tipo Rayleigh. La PDF de la envolvente típica de una señal recibida con desvanecimientos se muestra en la figura 7.

La probabilidad de experimentar un profundo desvanecimiento, por ejemplo de 3σ , donde σ es el valor RMS de la envolvente r_t recibida, es el área bajo la curva entre los valores de 3σ e ∞ . En la figura 8 se puede ver la PDF de Rayleigh con distintos valores de σ .

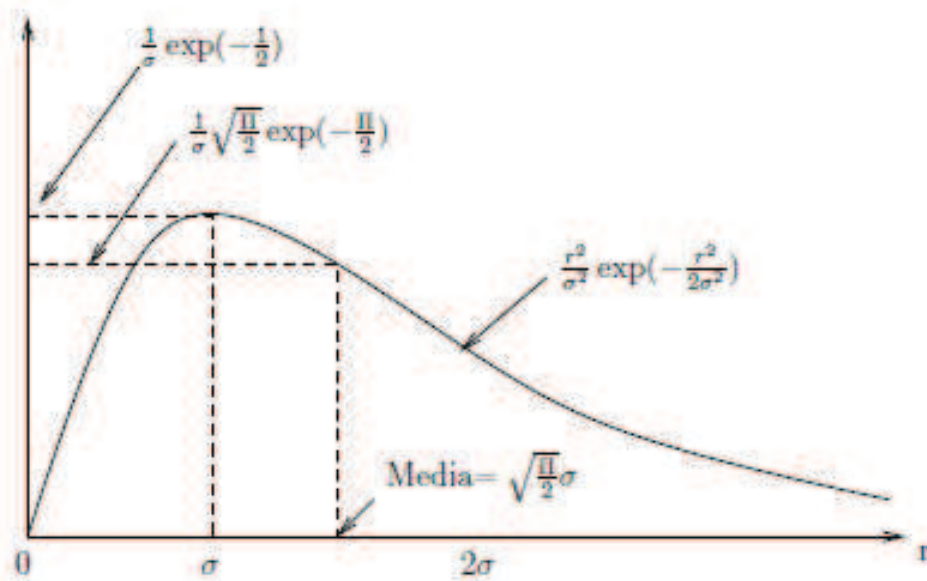


Figura 7: Función de densidad de probabilidad Rayleigh

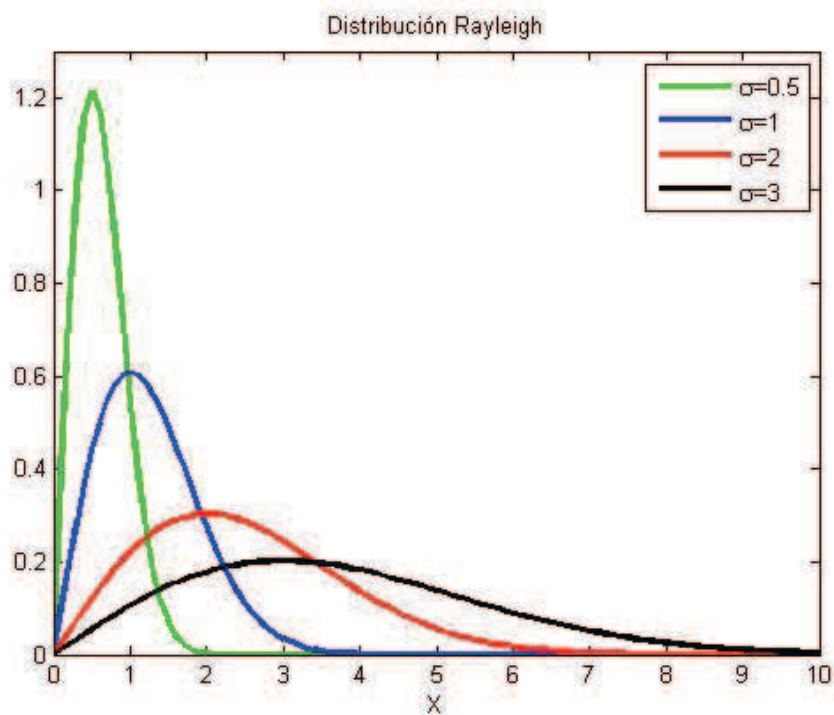


Figura 8: Función de densidad de probabilidad Rayleigh con distintos valores de σ

2.1.4 El canal Rice

En canales móviles con microcélulas una trayectoria dominante, la cual puede ser una trayectoria de línea de vista, frecuentemente aparece en el receptor, en adición con muchas otras trayectorias dispersas. Esta trayectoria dominante puede decrementar significativamente, la profundidad del desvanecimiento. En este caso la PDF de la envolvente recibida se denomina Rician. Para el modelado de este tipo de canal es conveniente introducir un parámetro K , conocido como parámetro Rician, con el propósito de medir la relación de potencia entre la señal dominante y el resto de las señales recibidas [7].

$$K = \frac{\text{Potencia en la trayectoria dominante}}{\text{Potencia en las trayectorias dispersas}} \quad (2.1)$$

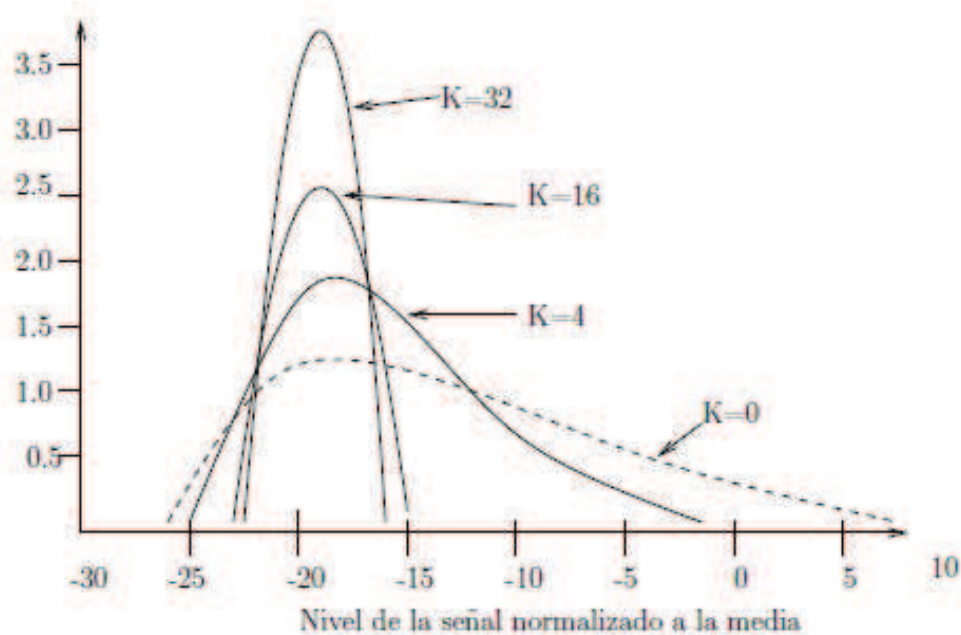


Figura 9: PDF normalizada a sus promedios locales

Cuando K tiende a cero el canal es del tipo Rayleigh, mientras que si K tiende infinito el canal es gaussiano. De esta manera, podemos considerar al canal Rician como un canal más general. Los desvanecimientos tienen una alta probabilidad de ser

más profundos cuando $K = 0$ (desvanecimiento Rayleigh) a ser muy poco profundos cuando $K = 32$ (aproximadamente gaussiano). Cuando la señal recibida está en un desvanecimiento profundo por debajo del nivel promedio del ruido del canal, un error ocurre. Sin embargo, el mismo promedio de ruido no causaría error cuando K sea más grande [7].

Finalmente, el canal de múltiples trayectos es la sumatoria de la multiplicación de los valores de σ por la señal de entrada al canal $s(t)$, mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Múltiples trayectos} = \sum \sigma s(t) \quad (2.2)$$

El diagrama del diseño del canal modelado se encuentra en la figura 10

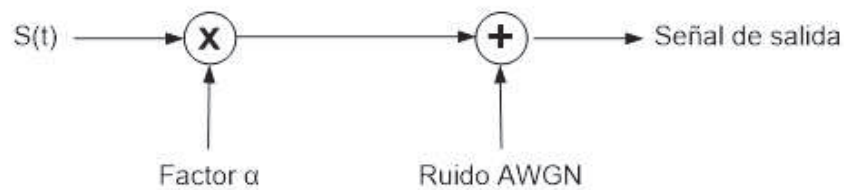


Figura 10: Función de transferencia del canal modelado

Para simular el canal de comunicaciones, en primer lugar se modela el canal Rayleigh o Rician, dependiendo de la configuración inicial, tomando en cuenta que la señal transmitida $r(t)$, en el simulador $y_{multipath}$, llega al receptor a través de múltiples trayectos $nTap$, donde el camino n_t tiene una atenuación $\alpha_n(t)$, en el simulador h , y un retardo $\tau_n(t)$, en el simulador $Delay$, dada por:

$$r_t = \sum_{n=1}^{nTap} \alpha_n(t) x[t - \tau_n(t)] \quad (2.3)$$

Donde, $x(t)$ es la señal a transmitir. Y mediante la convolución de dos señales discretas f y g :

$$f[m] * g[m] = \sum_{k=1}^{kn} f[m] g[m-n] \quad (2.4)$$

Se puede concluir que al obtener la convolución de la señal a transmitir $x(t)$ y el desvanecimiento $\alpha_n(t)$ se representa un canal con desvanecimiento con múltiples trayectos, tomando en cuenta el retardo y la potencia de cada uno.

2.2 Multiplexación por división ortogonal en frecuencia (OFDM)

La Modulación por División Ortogonal de Frecuencias (OFDM) es un esquema de modulación/demodulación multiportadora, por lo que su uso se da de manera natural para aplicaciones de banda ancha.

A diferencia de una comunicación monoportadora o *Single Carrier* (SC), donde cada símbolo se transmite de forma serial (uno a la vez), ocupando todo el ancho de banda disponible, en una modulación multiportadora se envían los símbolos de forma paralela en subportadoras adyacentes, es decir, usando algún tipo de multiplexación por división de frecuencias (FDM). Una comparación gráfica se puede ver en la figura 11.

La principal característica para su implementación en la actualidad es la utilización de la transformada rápida de Fourier o FFT para lograr la transmisión por medio de subportadoras paralelas de manera que se elimina en lo posible la interferencia o traslape entre ellas. Por eso el dato del número de subportadoras está ligado al número de muestras que usa la FFT, NFFT. Así es que, de manera general, OFDM refiere a la transmisión de una trama digital que requiere una gran tasa de transferencia mediante NFFT líneas paralelas más lentas, en subportadoras contiguas y ortogonales, que transportan símbolos independientes que son producto de algún tipo de modulación digital

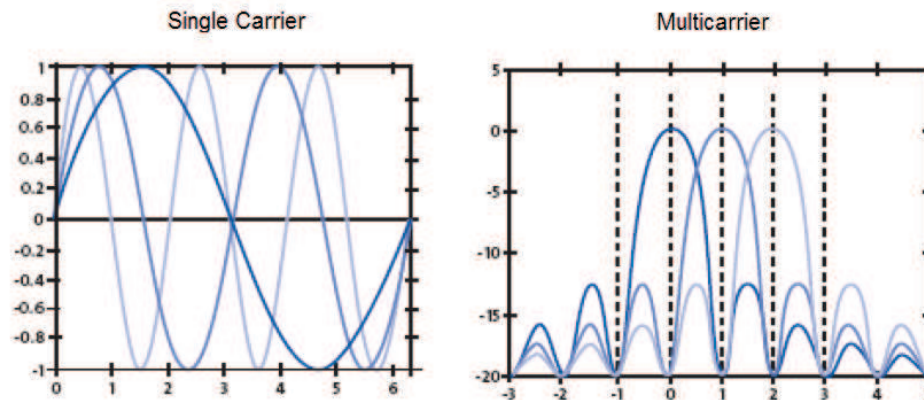


Figura 11: Comparación entre Single Carrier y Multicarrier

como QPSK, 16-QAM, 64-QAM, etc. dependiendo del sistema [9].

Siendo N subportadoras ortogonales las que se utilizan para un sistema OFDM cualquiera, éstas estarán separadas en frecuencia justamente por el valor correspondiente a la inversa del tiempo útil del símbolo OFDM, y durante este período se transmitirán N símbolos independientes codificados por QPSK, 16-QAM, 64-QAM o cualquier otro tipo de modulación I/Q. Dando, como resultado que el ancho de banda de cada subportadora, esté dado por:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N_{FFT}} = \frac{1}{T_u} \quad (2.5)$$

Donde, f_s es el ancho de banda teórico y N_{FFT} es el número de subportadoras.

2.2.1 Sistema general de OFDM

El esquema que se muestra en la figura 17, realiza la transmisión y recepción de símbolos utilizando una modulación OFDM.

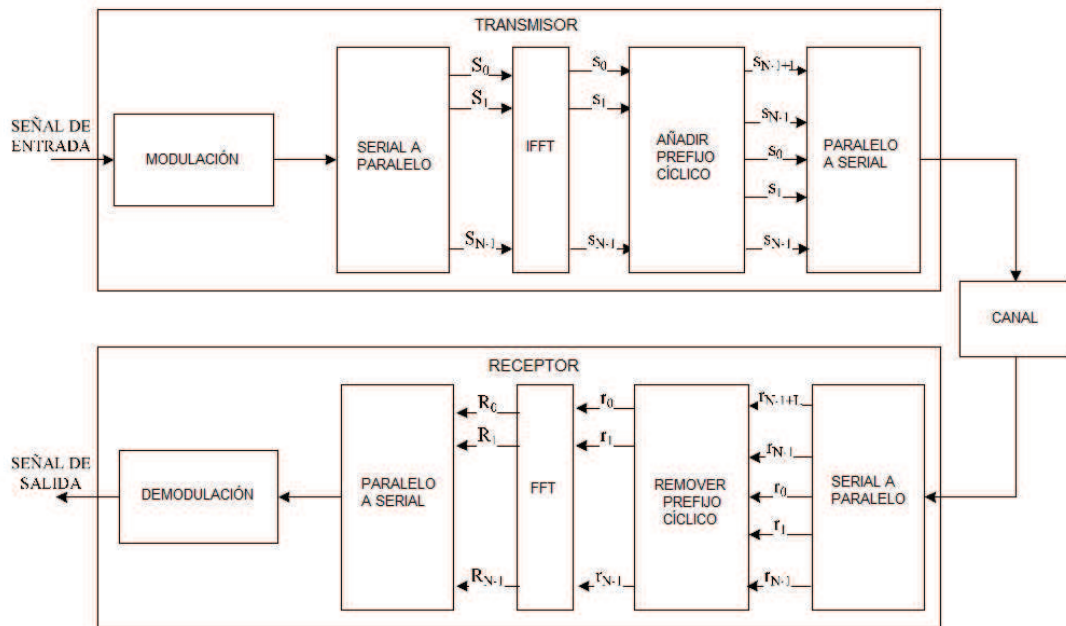


Figura 12: Modelo de un sistema OFDM simple

Como se aprecia en la figura 17, cuando una señal ingresa a un sistema OFDM es inmediatamente modulada, una vez que el flujo de datos serial de la señal ha sido modulado, este es dividido en N flujos paralelos. En el siguiente bloque del transmisor se toma simultáneamente la transformada rápida de Fourier de los N flujos paralelos. A continuación se agrega un prefijo cíclico de longitud L , para lo cual se añade al inicio de la señal los últimos L datos del símbolo OFDM. Finalmente se convierte la señal paralela en un flujo serial de datos. Este flujo serial de datos pasa por un canal de transmisión. Al terminar su paso por el medio de transmisión, la señal ingresa al receptor OFDM, y este realiza procesos inversos a aquellos asociados en el transmisor OFDM. Después de que la señal ha pasado por el receptor, esta debería ser semejante a la señal original, aunque esto último dependerá de las características del canal.

2.2.2 Uso de la FFT en OFDM

Un problema asociado con el esquema OFDM es que, para obtener una alta resistencia cuando se presentan desvanecimientos en el canal, el tamaño del bloque, N , debe estar en el orden de 100, lo cual hace que se requiera un gran número de módems de subcanal. Este problema se puede solucionar mediante el uso de la transformada discreta de Fourier (DFT), con la transformada discreta de Fourier se logra una simplificación en el hardware de un módem OFDM. La transformada de Fourier descompone o separa una forma de onda en sinusoides de frecuencias diferentes, las cuales al ser sumadas resultan en la forma de onda original [10].

La transformada de Fourier de $f(x)$ está definida por:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp^{-jx} dx. \quad (2.6)$$

Y su inversa está dada por:

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) \exp^{jwx} dw. \quad (2.7)$$

Sin embargo, la era digital obligó un cambio en la forma tradicional de la transformada de Fourier para que se ajuste a los valores discretos que existen en todos los sistemas digitales. Esta serie modificada fue llamada Transformada Discreta de Fourier (DFT). La DFT de un sistema discreto en el tiempo que esta definida por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp \frac{j2\pi kn}{N} \quad (2.8)$$

Y su inversa está denotada como:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{N-1}^{n=0} X(k) \exp \frac{j2\pi kn}{N} \quad (2.9)$$

Sin embargo, en los sistemas OFDM se utiliza otra forma de la FDT llamada la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual es un algoritmo de la DFT que reduce el

número de procesos computacionales.

2.2.3 Transmisor y Receptor OFDM

2.2.3.1 Transmisor OFDM

El Transmisor OFDM transforma de un grupo de bits a un grupo de números complejos correspondientes a valores dentro de las constelaciones disponibles para realizar la modulación I/Q [11].

Ademas, se tiene etapas destinadas a corrección de errores y la adición del prefijo cíclico. En general todo el tratamiento adicional que se debe hacer a los datos se realiza previo a la *iFFT*, que es el que hace la modulación OFDM propiamente dicha, a la cual ya llegan únicamente los símbolos I/Q ordenados en la trama que es la que se desea enviar.

En general con esto nos referimos a etapas de adición de códigos convolucionales o redundancia cíclica. Asimismo se puede incluir adición de FEC (*forward error correction*) en virtud de los cual se puede denominar al sistema como COFDM (*Coded OFDM*) [12].

En la etapa de codificación I/Q, se cuenta con un número finito de esquemas entre los que se puede escoger para operar entre los de mayor o menor orden de acuerdo al estándar a utilizar. En general los sistemas cableados como xDSL tienden a usar aquellos de mayor orden como 256-QAM mientras los sistemas inalámbricos se mantienen usando los de menor como BPSK o QPSK o sus modos diferenciales [12].

Dependiendo de tipo de tecnología, en el transmisor OFDM se usa constelaciones que utilizan *código gray* y *entrelazado*. También en la trama OFDM se suele completar con *inserción de pilotos*, donde se usan frecuencias fijas que no son usadas para datos,

y en su lugar se envían secuencias de datos conocidos con modulaciones bajas en el orden de BPSK o QPSK [9]. Estos pilotos se los utiliza para la sincronización de transmisor y receptor y la estimación del canal [9].

Con la trama completa, puede tener lugar una etapa de moldeamiento (*shaping*) del espectro de la señal, en función de los requerimientos en frecuencia de las etapas analógicas o de los DACs. Según el caso, este trabajo puede ser realizado por una sencilla tabla de búsqueda (*look up table*) según frecuencias, o bien por un filtro complejo para hacer las variaciones en amplitud y fase. Entonces, esta trama reformada es la que se introduce en la iFFT [12].

Luego de tener la trama en forma de sus muestras en el tiempo, es decir, luego de la iFFT, se tiene lugar a la adición del tiempo de guarda o prefijo cíclico (CP), donde se explica a más profundidad en la sección 2.2.4.

2.2.3.2 Receptor OFDM

El receptor se encarga de recibir la señal en forma compleja por medio de los canales I y Q (en fase y en cuadratura) para realizar el trabajo de demodulación, el cual primordialmente lo efectúa la FFT. La complejidad en su conjunto dependerá mucho de todas las etapas adicionales que hayan contemplado el estándar respectivo y demás mejoras que se hayan implementado en la parte del transmisor [12].

A la señal digitalizada, se extrae el tiempo de guarda, lo que para el sistema significa reducir el número de muestras de la *NFFT*, sobre las cuales se realizará la FFT que convertirá las muestras en tiempo, en muestras en frecuencia.

El receptor también tiene la responsabilidad de la sincronización en tiempo y frecuencia o ecualización, y de ser necesario etapas de realimentación para la estimación del canal, para la cuál debe valerse de secuencias de datos conocidos, así como pilotos

insertados en medio de los datos que se envían en las tramas. Finalmente, se realiza la etapas de demodulación, desentrelazado y de detección de errores.

2.2.4 Tiempo de Guarda y prefijo cíclico

En OFDM se inserta un tiempo de guarda entre los símbolos OFDM para prevenir las interferencias intersímbolo (ISI) e intercanal (ICI) en canales con multitrayectoria. El prefijo cíclico tiene una longitud, de N_g muestras, igual o mayor que el máximo rango de retardo del canal, como indica la figura 13 y según la teoría. El prefijo cíclico hace que la convolución lineal de la respuesta de impulso del canal y señal, se transforme en una convolución cíclica.

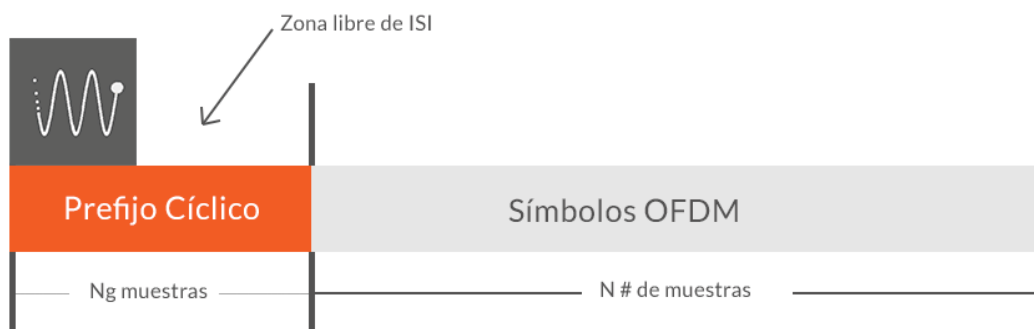


Figura 13: Intervalo de guarda

Básicamente, se lo utiliza como una banda de guarda para cada símbolo. Consiste en realizar una "copia" de la última parte de la señal del símbolo OFDM y colocarlo al inicio, como se muestra en la figura 14.

Para OFDM, básicamente es un estándar el uso de un prefijo cíclico durante este intervalo. De esta forma se completa el símbolo OFDM: añadiendo por delante de las NFFT muestras que emiten la iFFT. Entonces se debe distinguir entre el período útil T_u y el del tiempo de guarda T_g dentro del símbolo T_{sym} . Como primer resultado, esto reducirá la eficiencia de transmisión, pero los beneficios son mayores, como mitigando los efectos de retardo en el canal multitrayecto.

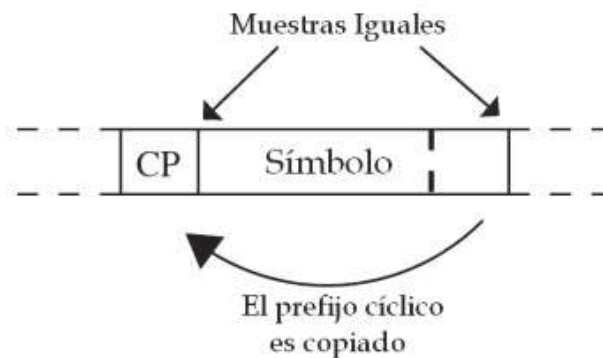


Figura 14: El prefijo cíclico

De acuerdo, a lo establecido anteriormente, el tiempo de símbolo de OFDM es,

$$T_{sym} = T_u + T_g \quad (2.10)$$

Y para el tiempo de guarda es,

$$T_g = G \times T_s \quad (2.11)$$

Existen más posibilidades para trabajar con el intervalo de guarda más allá de dejarlo en cero o de usar el prefijo cíclico durante todo él mismo, así como la variación de su longitud. Se puede mencionar el uso de un prefijo cíclico de 50% de ocupación del tiempo de guarda con cero señal en la otra mitad del período. Este tipo de implementación ofrece ventajas para la temporización del sistema, pero no presenta mucha protección contra canales con múltiples trayectos [13].

2.2.5 Ventajas de OFDM

Una de sus principales ventajas es la resistencia al desvanecimiento ocasionado por un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia mediante el adecuado tiempo de guarda, que se dan en ambientes sin líneas de vista o con línea de vista problemáticos, dos escenarios muy típicos en las ciudades; esto permite que el receptor no tendrá que

contar con una antena fuertemente direccionada, como es lo normal [14].

Desde el punto de vista de las técnicas de implementación y uso de recursos se cuenta con el que obtenemos una mejor eficiencia espectral a lo que se conseguiría con técnicas *SC* y que la implementación basada en la FFT reduce la complejidad de transmisor y receptor. La versatilidad del sistema permite la implementación de un sinnúmero de tecnologías complementarias que tienden a mejorar su funcionamiento global y aprovechar aún mejor el espectro, esto se consigue mediante técnicas combinadas [14].

2.3 Sistema de Televisión Digital ISDB-tb

A finales de 2016, se prevé inicie el apagón analógico, es decir, el cese de emisiones de televisión analógica para dar paso a la Televisión Digital Terrestre (TDT). A nivel mundial existen diferentes estándares adoptados para la TDT. En Ecuador, luego de varios estudios técnicos, se decidió adoptar el ISDB-Tb japonés con mejoras brasileñas. Gracias a este estándar Ecuador tiene parámetros claros para impulsar la transmisión en señal digital. El apagón analógico en Ecuador se realizará de manera progresiva. En el 2016 iniciará en: Quito, Guayaquil, Cuenca. Posteriormente, en el 2017 se realizará el apagón analógico en varias capitales de provincia y, finalmente, en el 2018, todo el territorio nacional tendrá únicamente señales de televisión digital [15].

Además de transmitir audio y vídeo, esta tecnología define conexiones de datos con Internet, como un canal de retorno sobre medios y con diferentes protocolos, para interfaces interactivas como aplicaciones informativas y guías electrónicas.

Para la transmisión digital, se utiliza *Transport Stream*, TS, de tamaño fijo de 188 bytes, ISO/IEC 13818-1 (4 bytes de cabecera), donde se encuentra toda la información de audio y vídeo. Cada TS es identificado por un PID (*Packet Identifier*).

El sistema de transmisión de ISDB-T que se presenta en la figura 16 utiliza una estructura jerárquica, soportada por OFDM. Se compone de tres capas A,B,C, con configuración independiente, tanto de la tasa de código convolucional, como del tipo de modulación, QPSK, DQPSK, 16 QAM y 64 QAM, lo que garantiza la robustez y el desempeño del sistema frente al ruido y al desvanecimiento, lo que permite la modificación de la tasa de transmisión.

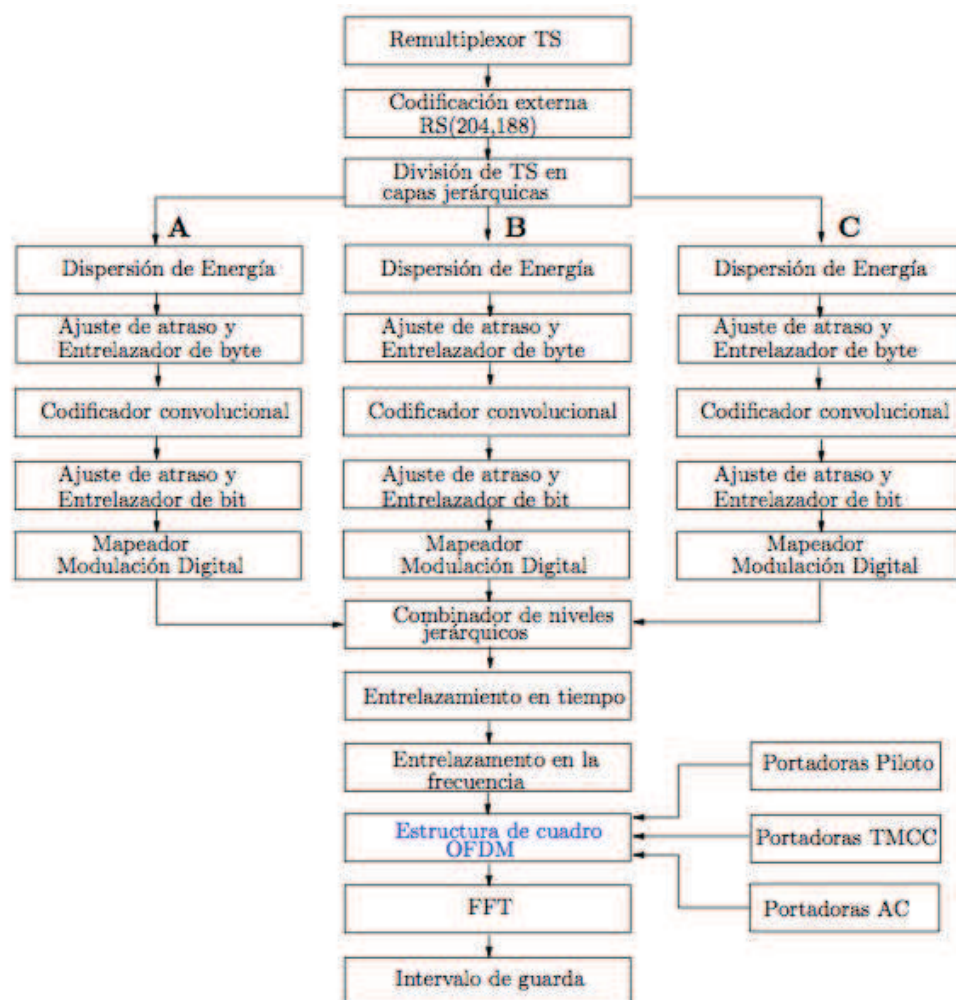


Figura 15: Modelo de Transmisión

Para definir el segmento OFDM de una transmisión de ISDB-tb, se parte de que el ancho de banda de un canal en televisión analógica es de 6 MHz, pero ahora se divide para 14 segmentos (bandas de frecuencia), donde 13 de ellos son utilizados para

transmitir la señal de TDT, asociado las capas A, B y C. En la figura 16 se observa un ejemplo de configuración de capas, donde la capa A es 1 segmento, capa B es 7 segmentos y la capa C es 5 segmento. El segmento cero, se ubica en el centro para garantizar las comunicaciones móviles con baja definición, ya que se encuentra en la frecuencia central y utiliza un único segmento (*One Seg*). De esta forma se define los modos de transmisión para televisión digital, partiendo de las características de transmisión y del número de portadoras.

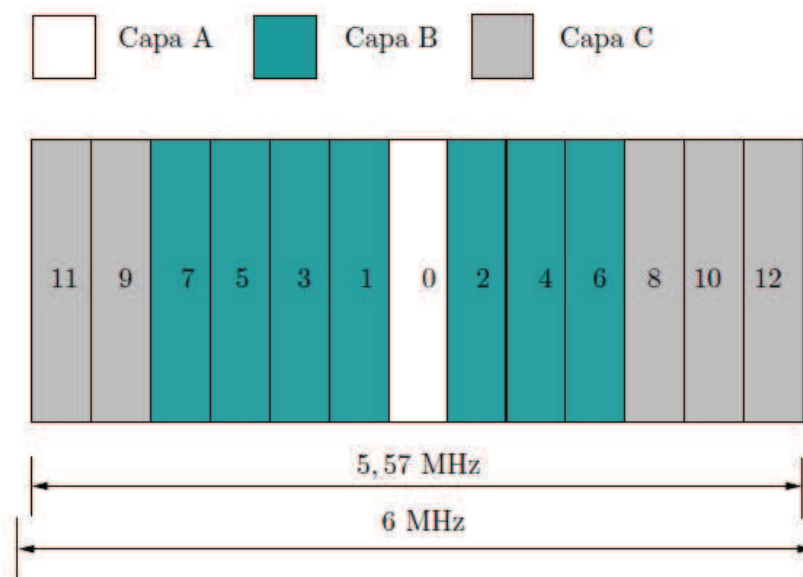


Figura 16: Formación del cuadro OFDM

Un segmento OFDM utiliza un ancho de banda B_s , dada por:

$$B_s = \frac{B}{14} = \frac{6}{14} [MHz] B_s = 428.57 [kHz] \quad (2.12)$$

Además, existe los tres modos de transmisión, diferenciados por el número de portadoras:

Las N portadoras ortogonales en un segmento OFDM tienen frecuencias múltiples de $\delta_f = \frac{428.57}{N} kHz$ y con un período de símbolo OFDM dado por: $T = \frac{1}{\delta_f}$, donde el valor de N depende del modo de transmisión para ISDB-t, como se observa en la tabla

Tabla 1: Modos de transmisión

	Total (N)
Modo 1	108
Modo 2	216
Modo 3	432

1.

Para el caso de *One Seg*, considerando el modo 1, se tiene lo siguiente:

$$\delta_f = \frac{428.57}{N} [kHz] \delta_f = \frac{428.57}{108} [kHz] \delta_f = 3.968 [kHz] \quad (2.13)$$

Donde, el tiempo de OFDM es:

$$T = \frac{1}{\delta_f} T = \frac{1}{3.968 [kHz]} T = 252 \mu s \quad (2.14)$$

CAPÍTULO 3

SIMULADOR DEL SISTEMA DE TELECOMUNICACIONES CON TÉCNICA OFDM

3.1 Herramientas de desarrollo

Para la creación de un simulador OFDM se necesita de un programa computacional que posea todos los elementos necesarios y además, de procesar los datos que den como resultado del sistema de comunicación OFDM. Por esta razón, la herramienta de software matemático que se va a utilizar es MATLAB versión 8.1.

MATLAB es un software orientado a llevar a cabo proyectos donde se encuentren elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los datos, permite la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes y dispositivos [16].

3.2 Estructura del Simulador

Para el desarrollo del simulador se utiliza un modelo de la técnica de OFDM simple, en primera instancia, hasta llegar a implantar todos los bloques necesarios para el trabajo. En la figura 17 se puede observar el diagrama de bloques implementado en este trabajo.

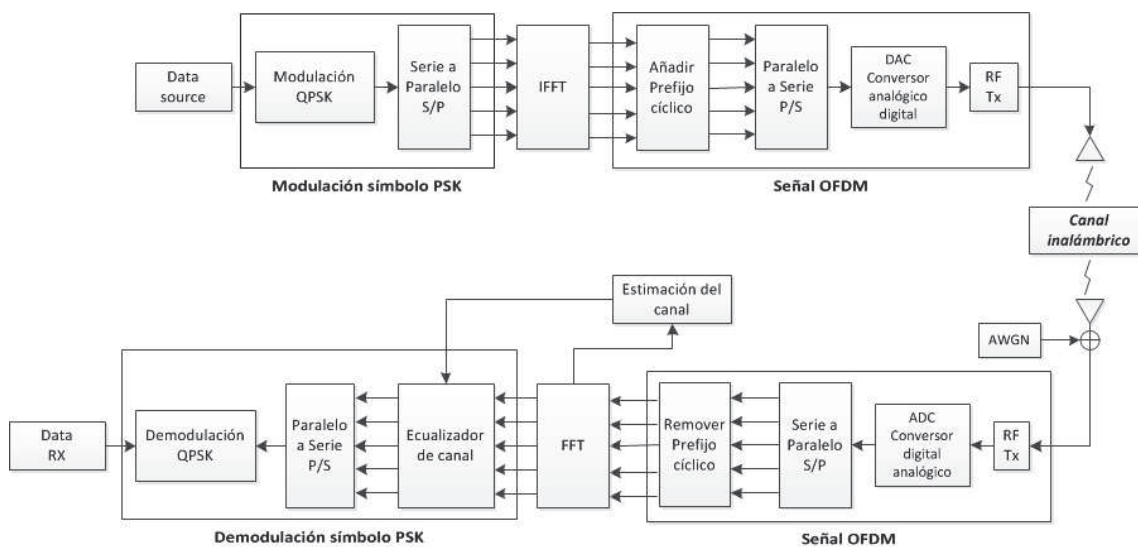


Figura 17: Diagrama de bloques de un TX y RX de un sistema OFDM

En el diagrama se puede ver el bloque de transmisión OFDM, canal inalámbrico con desvanecimiento selectivo en frecuencia y receptor OFDM.

A continuación se explicará en detalle cada configuración y el procedimiento para la creación de cada uno de los componentes del simulador:

3.2.1 Transmisor OFDM

Para el transmisor OFDM se puede considerar modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM, el número de símbolos OFDM por frame, las iteraciones que se realiza, el número de subportadoras y el modo de transmisión para ISDB-tb. Conforme al diagrama de la figura 17, se realiza el siguiente código en Matlab para el transmisor OFDM.

Código 3.1: Transmisión OFDM

```

1  %BITS ALEATORIOS
2  X = randng(TS); % Random number generator 188 Bytes
3  x_reed = rsencode(X,enc); % Encode Reed Solomon (204,188)
4  [alpha, x_ent] = interl(x_reed); % Convolutional interleaver
5  x_bin=decimal2bin(x_ent,8); % Decimal to bin conversion
6  x_bin_ajus=x_bin;
7  if rate==4, x_bin_ajus=[x_bin zeros(1,3)]; end
8  if rate==5, x_bin_ajus=[x_bin zeros(1,6)]; end
9  x_cod=convencode(x_bin_ajus,rate); % Convolutional Encoder
10 x_cod_ajus=[x_cod zeros(1,n_simbolos*nFFT*Nbps-length(x_cod))];
11 x_mod=modulator(x_cod_ajus',M); % Modulator (4)QPSK, (16)16QAM (64)
    64QAM
12
13 %TX-----
14 x_QPSK = qammod(X,M,0,'gray')/norms(Nbps); % Modulacion
15 x_QPSK_paralelo = reshape(x_QPSK,nFFT,n_simbolos); % Serie a
    Paralelo
16 x_ifft = ifft(x_QPSK_paralelo); % IFFT
17 x_ifft_GI = vertcat(x_ifft([nFFT-nG+1:nFFT],:), x_ifft(:,:)); %
    Agregar Prefijo ciclo
18 tx = reshape(x_ifft_GI,1,n_simbolos*nSym); % Paralelo a Serie

```

En el código se puede ver las etapas de modulación, el paso de serie a paralelo para el bloque de *IFFT* y la adición del prefijo cíclico.

3.2.2 Canal inalámbrico

A continuación se detalla el código del simulador, donde se puede simular un canal Rayleigh o Rice y la potencia y retardos de cada trayecto.

Código 3.2: Canal inalámbrico multipath

```

1 %MULTITRAYECTOS
2 K=10^(K_dB/10); %Factor K para canal Rician
3 channel=(randn(1,nTap)+1i*randn(1,nTap)).*sqrt(Power/2); %Modelado
   del canal Rayleigh
4 if multipath_ch==0 %Modelado del canal Rician
5     channel=sqrt(K/(K+1))+sqrt(1/(K+1))*channel;
6 end
7 h=zeros(1,Lch);
8 h(Delay+1)=channel; % Respuesta impulsiva del canal
9 y_multipath = conv(tx,h);

```

Para finalizar se introduce el ruido AWGN, sin utilizar la función propia de Matlab `awgn()`, mediante el cálculo de la potencia del ruido AWGN:

$$SNR_{dB} = potencia\ senal_{dB} - potencia\ ruidodB \quad (3.1)$$

$$potencia.ruidodB = potencia.senal_{dB} - SNR_{dB} \quad (3.2)$$

Como se conoce la señal que se va a transmitir y el valor de SNR, se puede deducir el valor de σ para el cálculo de distribución gaussiana del canal AWGN, mediante el siguiente cálculo:

$$no = 10^{potencia,ruidodB/10} \quad (3.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{no}{2}} \quad (3.4)$$

En el simulador, el código es el siguiente.

Código 3.3: Canal inalámbrico AWGN

```

1 % ADICION RUIDO AWGN
2 % Calculo de la potencia de la senal
3 serie_x_ifft = reshape(y_multipath,1,n_simbolos*nSym+max(Delay));
4 signal_power_db_QPSK = 10*log10(norm(serie_x_ifft)^2/(n_simbolos*
   nSym+max(Delay)));
5 nodb_QPSK = signal_power_db_QPSK-eb;
6 no_QPSK = 10^(nodb_QPSK/10);
7 sigma_f_QPSK = sqrt(no_QPSK/2);
8 % Ruido AWGN
9 y_awgn=normrnd(0,sigma_f_QPSK,1,n_simbolos*nSym+max(Delay))+1i*
   normrnd(0,sigma_f_QPSK,1,n_simbolos*nSym+max(Delay));

```

Para finalmente introducir el ruido AWGN mas el canal con múltiples trayectos:

Código 3.4: Canal inalámbrico

```

1 y = y_multipath + y_awgn;

```

3.2.3 Receptor OFDM

Para el receptor OFDM se debe tomar en cuenta el retiro del prefijo cíclico de cada símbolo OFDM y la estimación del canal mediante la respuesta en frecuencia del valor de *alfa*. Para el código del receptor es el siguiente.

Código 3.5: Receptor OFDM

```

1 %RX-----
2 rx = reshape(y(1:n_simbolos*nSym),nSym,n_simbolos); % Serie a
   Paralelo
3 rx_GI = rx([nG+1:nSym],:); % Remover prefijo cíclico

```

```
4 rx_fft = fft(rx_GI); % FFT
5 for kk=1:n_simbolos
6     rx_fft_eq(:,kk) = rx_fft(:,kk).'/h_shift; % Ecuacion
7 end
8 Xmod_r = reshape(rx_fft_eq,1,nFFT*n_simbolos); % Paralelo a Serie
9 r_bin=demodulator(Xmod_r',M); % Demodulator QPSK,16QAM,64QAM
10 r_dec=convdecod(r_bin(1:length(x_cod))',rate); % Convolutional
    Decoder
11 r_din=deinterl(r_dec(1:length(x_bin)),alpha); % Convolutional
    deinterleaver
12 sh = rsdeco(r_din,dec); % Decoder Reed Solomon (204,188)
```

En el código del receptor OFDM se puede observar las etapas de remoción del prefijo cíclico, la etapa FFT, la ecualización del canal y la respectiva demodulación.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DEL SISTEMA

OFDM

En este capítulo se va a definir las pruebas para validar en el simulador. En los bloques de código utilizados para implementar el sistema OFDM existen parámetros que se pueden modificar, así que estos se detallarán de acuerdo a los pruebas necesarias.

4.1 Definición de los parámetros del sistemas

Una de las aplicaciones que utilizan OFDM, es la tecnología ISDB-tb para Televisión Digital, por este motivo se lo va a tomar como ejemplo para realizar las pruebas del simulador.

4.1.1 Valores de los parámetros usados en el transmisor y receptor

Para simular un sistema ISDB-tb se deben definir ciertos parámetros que están relacionados con los procesos de transmisión y recepción, estos parámetros son: el tipo de modulación, el número de subportadoras, la dimensión de la transformada rápida de Fourier, la longitud del prefijo cíclico y el modo de transmisión, donde se define el

tiempo del símbolo OFDM.

El tipo modulación que utiliza el estándar es QPSK, 16QAM y 64QAM, cuyas constelaciones estan en las figuras 18, 19 y 20; dependiendo de tipo de capa para transmisión en televisión digital. Esto se debe a que las modulaciones de alto nivel como 64 QAM necesitan más SNR para operar a altas tasas de transmisión, por este motivo las estaciones receptoras cercanas a la estación transmisora trabajarán con modulación QAM, mientras que las más lejanas donde la relación señal a ruido es menor se utilizará una modulación de menor nivel como BPSK.

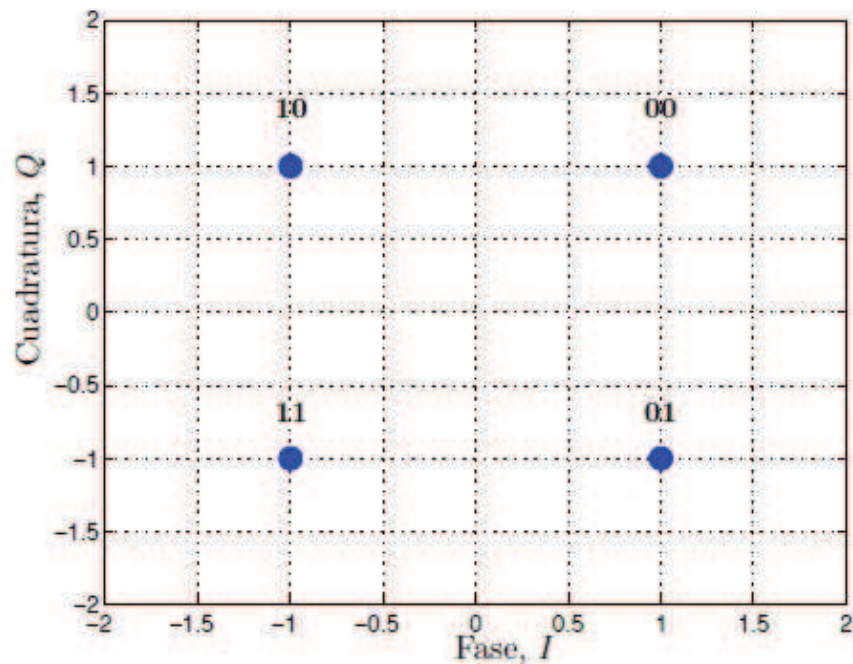


Figura 18: Modulación QPSK

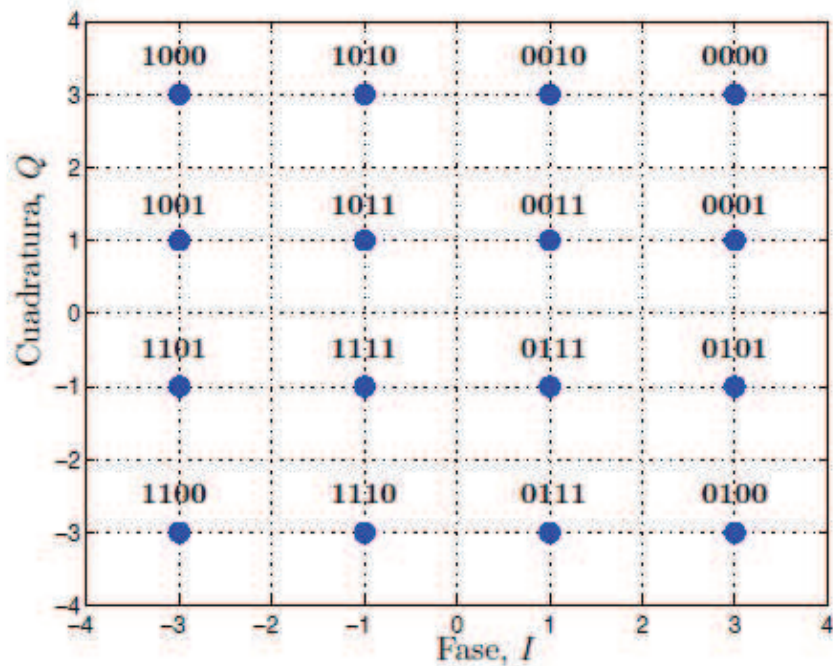


Figura 19: Modulación 16QAM

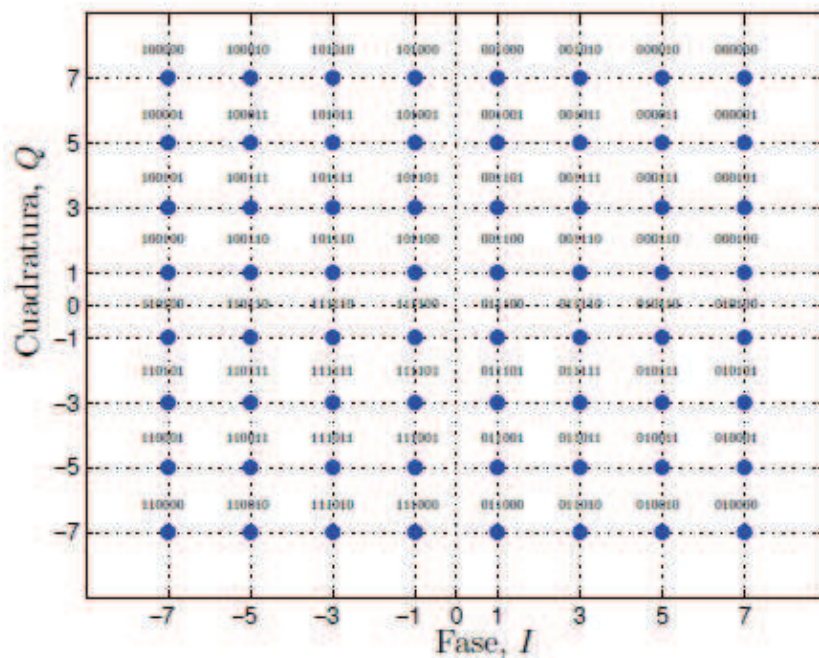


Figura 20: Modulación 64QAM

En el trabajo se va a implementar los 3 tipos de modulaciones en el transmisor OFDM y el respectivo demodulador en el receptor OFDM.

Ya que el trabajo está orientado al análisis del tiempo de guarda, se va a establecer como fijo e igual el número de subportadoras a la dimensión de la transformada rápida de Fourier, igual a 64.

En ISDB-tb existe 3 modos de transmisión, donde se define el tiempo de símbolo OFDM. Las N portadoras ortogonales en un segmento OFDM tienen frecuencias múltiplos de $\Delta_f = \frac{428,57}{N} kHz$ y con período de símbolo OFDM dado por: $T = \frac{1}{\Delta_f}$. La figura 21 ilustra gráficamente las primeras portadoras ortogonales y el tiempo de símbolo de cada modo de transmisión, pero para la simulación solamente se va a utilizar *One Seg.*

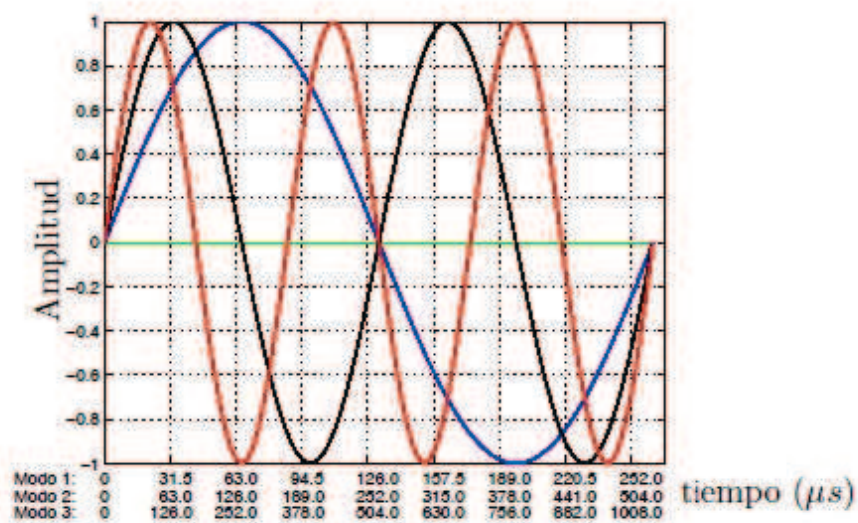


Figura 21: Frecuencias ortogonales

Durante las pruebas del simulador se va a variar el tiempo de guarda desde cero hasta el tiempo de símbolo OFDM, de esa forma se va a analizar los cambios que este tiene en el BER. Además, se va a realizar la copia del símbolo OFDM y *copiar* al

Tabla 2: Relación de distancias de los trayectos

Trayecto	Distancia
d 1	1.3 d
d 2	1.5 d
d 3	2 d

inicio de cada símbolo; como se indicó en el capítulo 3. Los valores que va a tomar el tiempo de guarda es 0, 1/32, 1/16, 1/8 y 1/4 de un símbolo OFDM.

Para el código convolucional se va a utilizar tasas de 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8.

Para el receptor OFDM, se va a retirar el prefijo cíclico introducido en el transmisor y los demás procesos.

4.1.2 Valores de los parámetros usados en el canal inalámbrico

Los parámetros definidos por el canal son el retardo y la atenuación de las señales de los múltiples trayectos, los cuáles son utilizados en todas las simulaciones.

Para el cálculo del tiempo de cada trayecto se utiliza la distancia establecida en la tabla 2 que recorren cada señal hasta llegar al receptor, como indica la figura 22, y considerando la velocidad de la luz por $3 \times 10^8 m/s$. Además, de establecer como distancia en TX y RX de $5km$.

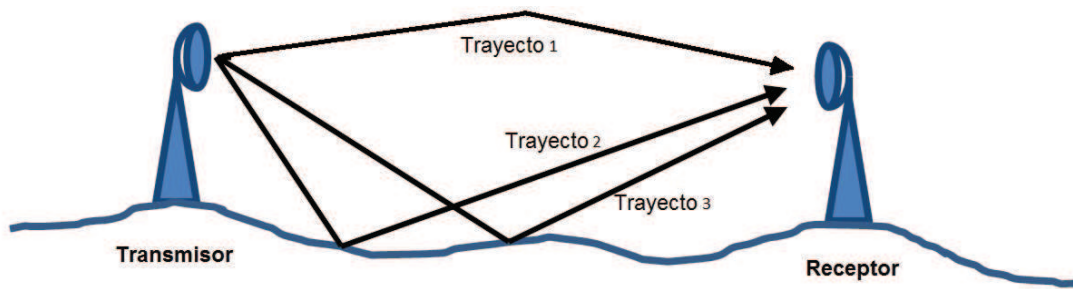


Figura 22: Frecuencias ortogonales

Para cálculo de la atenuación de cada señal se utiliza la siguiente fórmula, donde d es la distancia de cada trayecto, β es el número de trayectos y P_{TX} es la potencia de transmisión que para este caso se va a considerar $500Watt$.

$$P_t = P_{TX} \cdot d^{-\beta}$$

A los bloques de retardo se les debe especificar un número N de muestras en retraso, por esta razón se dividen estos valores de retardo entre el tiempo de símbolo OFDM para así encontrar el número de muestras que se retrasará la señal. El vector de atenuación se configura con los valores dados en decibeles $[dB]$ de cada trayecto.

4.2 Resultados de las pruebas

Después de ejecutar el simulador se tiene los siguientes resultados, desde la figura 23 hasta la figura 25, se utilizó un modelo de canal Rayleigh, con modo 1 de transmisión ISDB-tb, *One Seg*, con modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM.

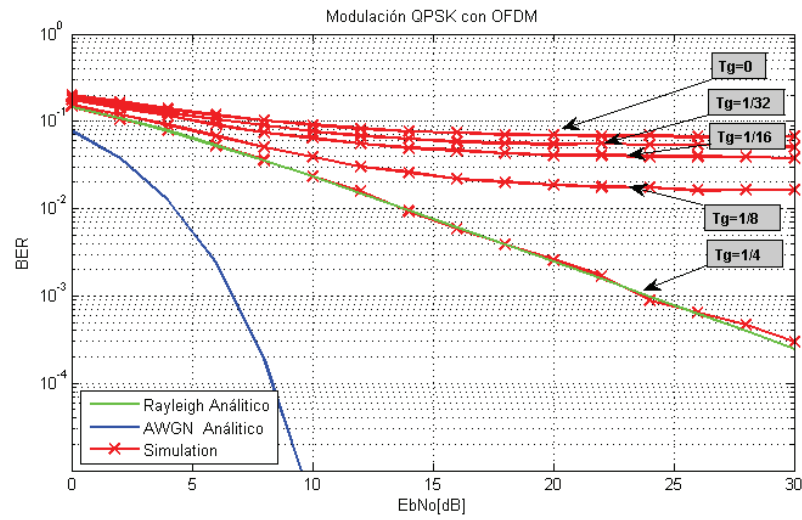


Figura 23: Curva de BER con sistema OFDM y modulación QPSK

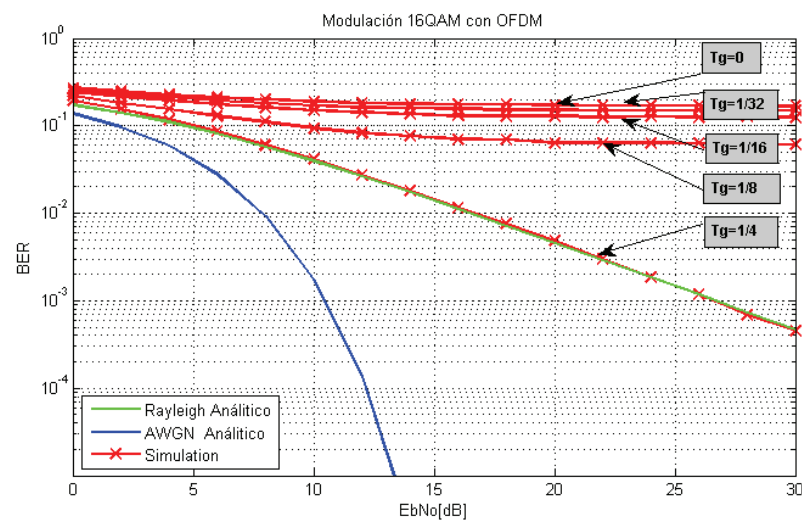


Figura 24: Curva de BER con sistema OFDM y modulación 16QAM

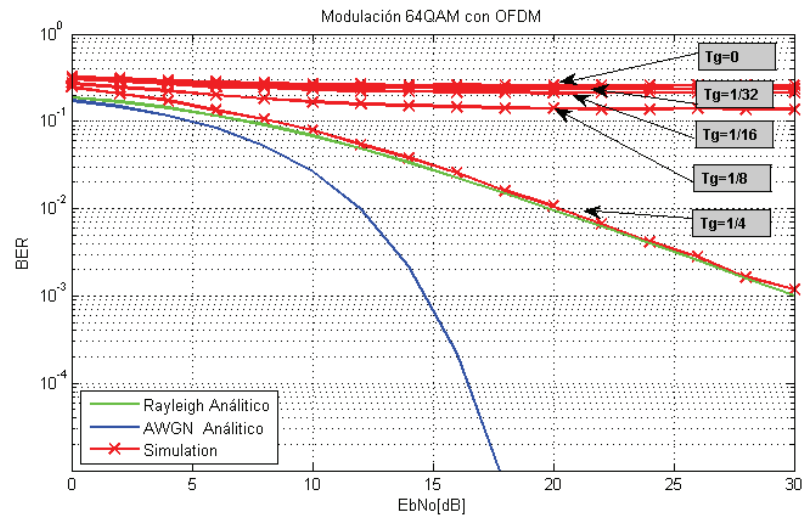


Figura 25: Curva de BER con sistema OFDM y modulación 64QAM

Las siguientes pruebas se realizan comparando el modelo Rayleigh y Rician, utilizando el modo 3 de transmisión ISDB-tb y utilizando la modulación 64QAM. Esto se puede ver en las figuras 26 y 27. Además, en la figura 27, donde se utiliza el modelo de Rician, se tiene un factor K de 15dB y la curva teórica analítica de Rayleigh.

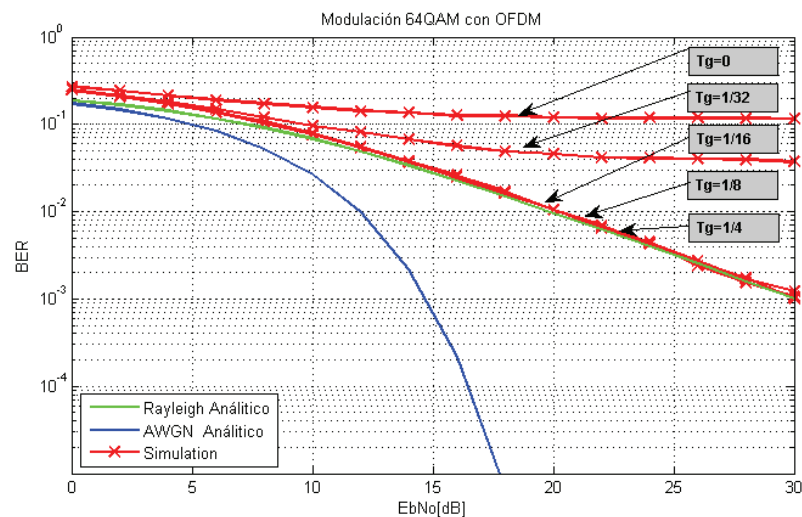


Figura 26: Curva de BER con sistema OFDM y canal Rayleigh

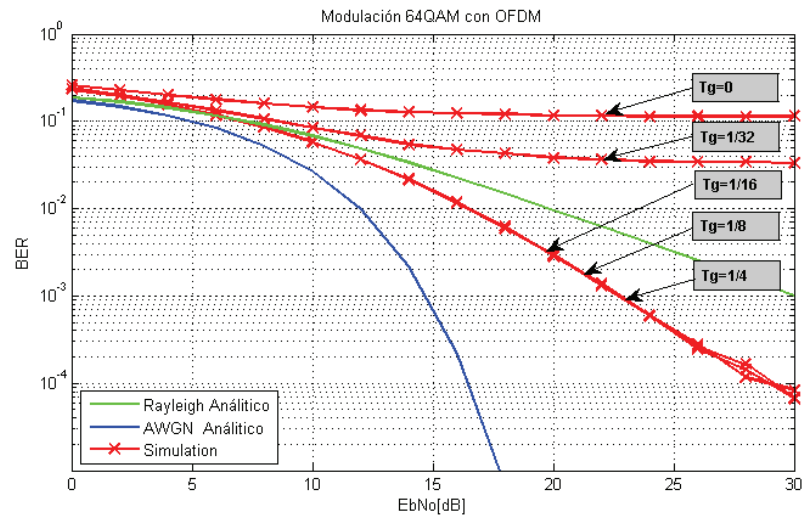


Figura 27: Curva de BER con sistema OFDM y canal Rician

En la siguiente pruebas, se evalúa los modelos de canales de Rayleigh y Rician, pero ahora se utiliza el modo 2 de transmisión ISDB-tb y una modulación QPSK. Esto se puede ver en las figuras 28 y 29.

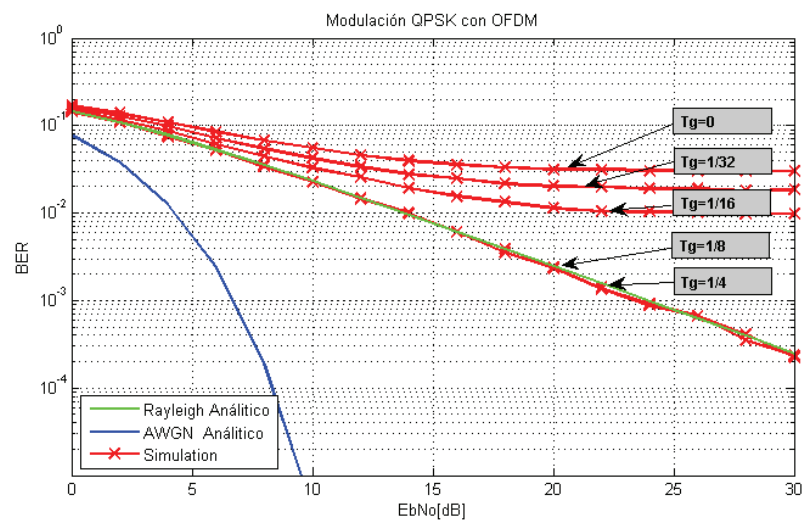


Figura 28: Curva de BER con sistema OFDM y canal Rayleigh

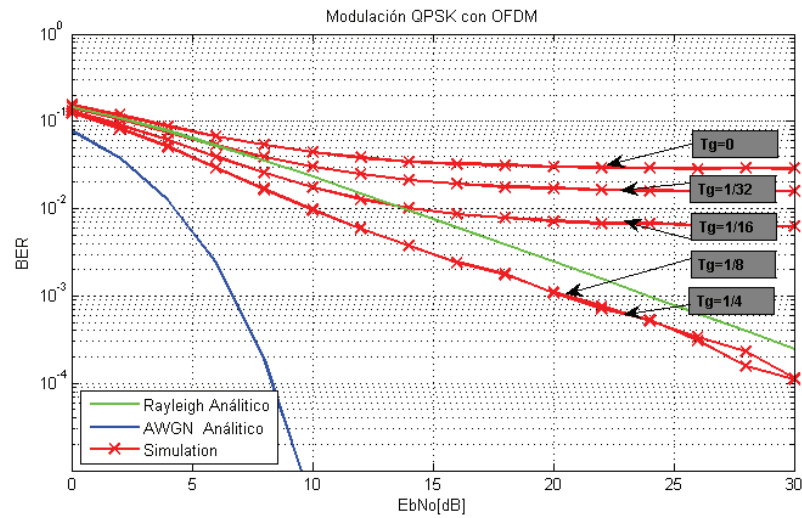


Figura 29: Curva de BER con sistema OFDM y canal Rician

Para finalizar, se realiza la simulación en las figuras 30 hasta la figura 34, utilizando el sistema ISDB-t y además, se agrega un Codificador de Reed Solomon, Interleaver, código convolucional para el modo 1, *One Seg*, y con una modulación QPSK. En las simulaciones se utilizó distintos valores de la tasa de código convolucional.

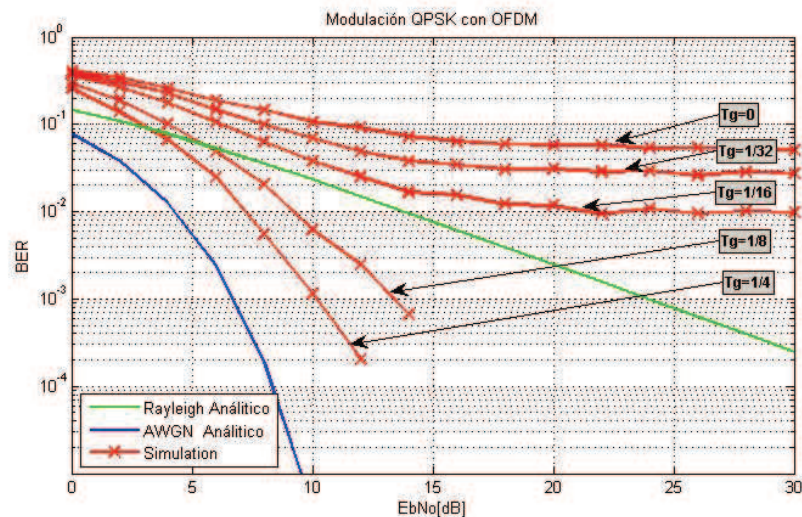


Figura 30: Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 1/2

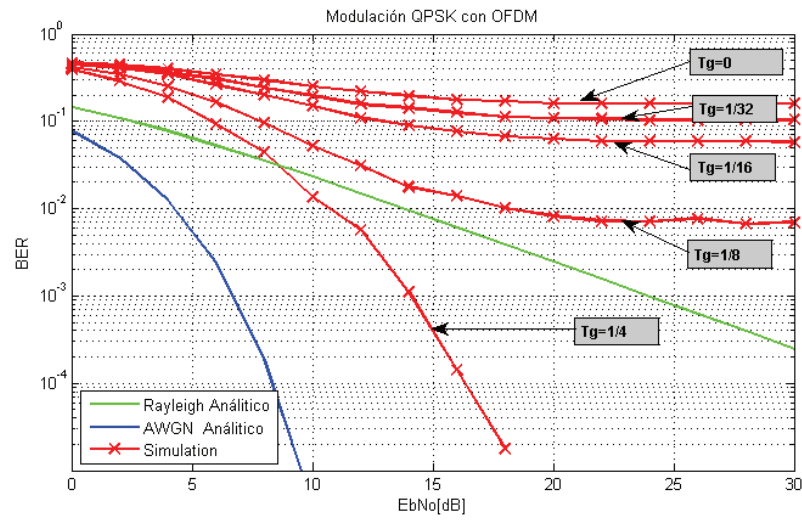


Figura 31: Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 2/3

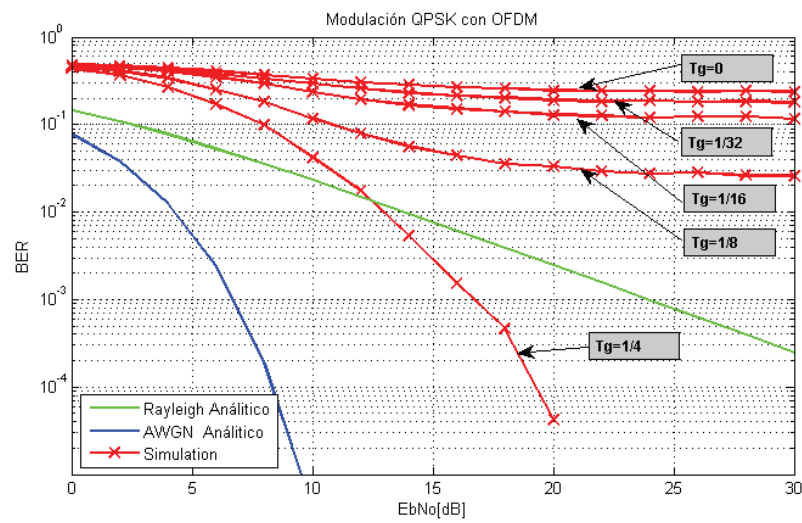


Figura 32: Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 3/4

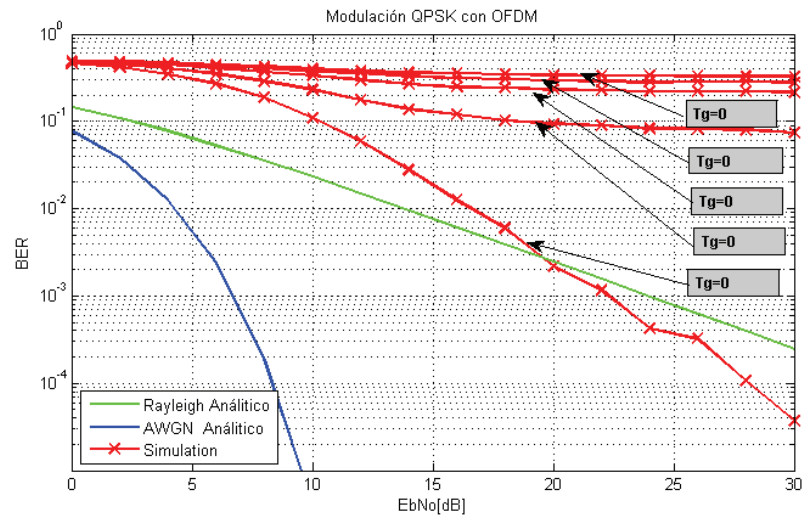


Figura 33: Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 5/6

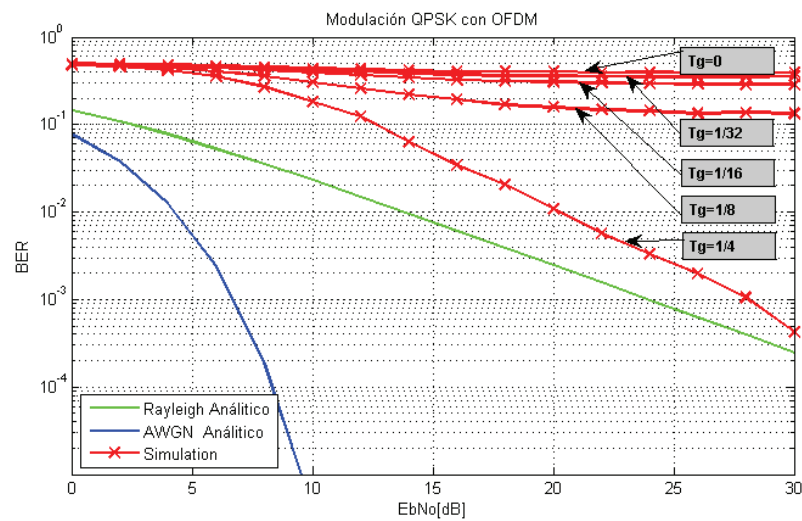


Figura 34: Curva de Ber de un sistema ISDB-tb con Tasa 7/8

4.3 Análisis de Resultados

De los resultados obtenidos, se va a determinar la potencia media de la señal recibida mas el tiempo de guarda utilizado para establecer una relación.

En la simulación se calcula la potencia de la señal recibida en cada iteración para después determinar el promedio. Esto se lo realiza para cada tiempo de guarda, como se lo puede ver en la figura 35 donde el valor de la potencia está normalizado.

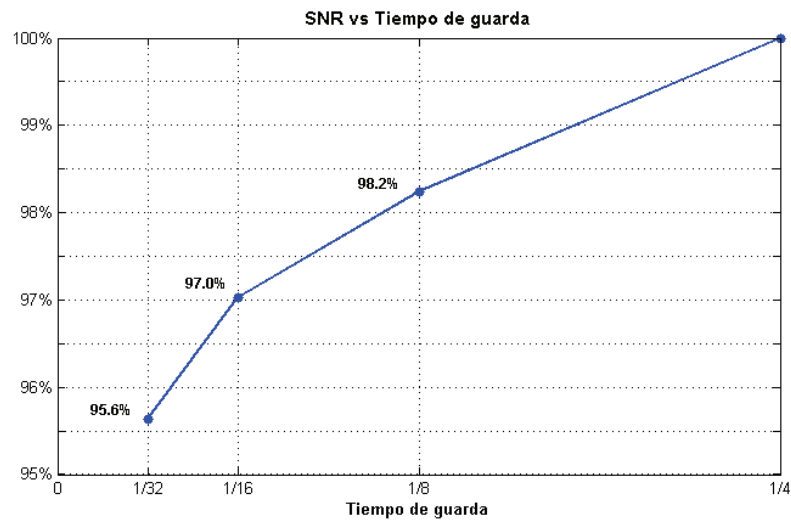


Figura 35: Relación de la potencia de señal recibida y tiempo de guarda

Como se lo esperaba, el valor de la potencia aumenta con respecto al tiempo de guarda. Mientras mayor sea el prefijo cíclico, el símbolo OFDM se vuelve mas extenso haciendo que la potencia sea mayor.

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

5.1 Conclusiones

- Se desarrolló un simulador de un sistema de telecomunicaciones de OFDM para Televisión digital terrestre bajo el estándar ISDB-T con la ayuda del software Matlab permitiendo realizar el análisis y desempeño del tiempo de guarda T_g mediante las pruebas de simulación en canales móviles.
- Los resultados obtenidos mediante la curva de BER (*Bit Error Rate*), se compara con la E_b/N_0 , mediante la cuál se compara con los valores analíticos de las ecuaciones teóricas de canales modelados con Rayleigh y AWGN.
- Éste proyecto sirve para realizar investigación ya que algunas variables de transmisión y recepción pueden ser modificadas, como por ejemplo la modulación a 16QAM o 64QAM, la tasa de los códigos convolucionales; además, de variar el número de subportadoras a utilizar para datos o las subportadoras de la FFT.
- Se investigó y analizó cada variable del transmisor y receptor de un sistema de TDT con tecnología ISDB-tb para determinar su mejor desempeño en la movilidad.

- Se analizó el canal inalámbrico y sus variables, logrando modelar un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencias mas ruido gaussiano blanco, ya que es el más cercano para simulaciones con varios obstáculos, al igual que las grandes ciudades, como Quito y Guayaquil.
- Mediante el modelado de un canal Rayleigh y Rician, se puede determinar que el segundo tiene un mejor desempeño ya que tiene línea de vista directa entre transmisor y receptor, logrando suprimir drásticamente los múltiples trayectos; a diferencia de Rayleigh que no lo tiene.
- Mediante el uso de Código Reed Solomon, Interleaving y Codigos convoluciones se puede mejorar el desempeño del sistema de telecomunicaciones, hasta en ciertas ocasiones mejorando la curva de Rayleigh.
- Utilizando el modelado de canal Rician, códigos de bloques o códigos convoluciones, no se puede mejorar el desempeño a AWGN, debido al desvanecimiento selectivo en frecuencia.
- El modo de transmisión *One Seg* es utilizado para sistemas con movilidad en TDT, ya que garantiza mejorar la comunicación, debido a su ubicación en el ancho de banda (frecuencia central), en comparación con sus otros modos de transmisión.
- Al cambiar la tasa del código convolucional de $1/2$ a $7/8$, se puede verificar que el desempeño disminuye en comparación con la curva de BER analítica de Rayleigh.
- El tiempo de guarda óptimo para OFDM que se debe utilizar es el tiempo máximo de retardo de los trayectos; a partir de este valor, los resultados son semejantes, ocasionando mayor procesamiento y disminución de la tasa de transmisión de datos.

- Existe una relación entre el tiempo de guarda y SNR de la señal recibida, ya que al aumentar este tiempo la potencia de la señal también aumenta.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda introducir códigos de corrección de errores y códigos convolucionales para mejorar el desempeño del sistema de televisión digital terrestre ya que se aplica para movilidad, la cuál ocasiona mayor desvanecimiento.
- Se recomienda desarrollar el simulador, desde lo sencillo hasta lo complicando, ya que de esta manera se establece correctamente el modelado del canal, para finalizar con los pasos de transmisión y recepción.
- Para el transmisor se recomienda completar los vectores para modulaciones, símbolo OFDM y códigos convolucionales con bits en cero para evitar errores de simulación.
- Antes de desarrollar el simulador es necesario realizar un diagrama de bloques general para saber la correcta ubicación de los bloques para poder establecer el receptor en función del transmisor.

5.3 Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se plantea el análisis de cada componente y sus variables para mejorar el desempeño, como por ejemplo el número de portadoras para IFFT, el cambio de la modulación, etc.

Se propone también la inclusión de nuevos modelados de canal inalámbrico, para determinar su desempeño, como por ejemplo del efecto doppler, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UIT. Historia de las telecomunicaciones. [Online]. Available: <http://www.itu.int/es/about/Pages/history.aspx>
- [2] M. Sanjiti, *Digital signal processing: a computer-based approach*. McGraw-Hill, 2001.
- [3] N. YUAN, "An equalization technique for high rate ofdm systems," *University of Saskatchewan*, 2003.
- [4] A. Mitalee and R. Yudhisthir, *Evaluating the impact of Guard Period on the performance of MIMO-OFDM system*. IJERA.
- [5] J. Dushantha and I. Leonardo, *Coded QPSK-OFDM for Data Transmission over Fading Channels*, 2012.
- [6] D. Parsons, *The mobile radio propagation channel*. Wiley, 1992.
- [7] L. Hanzo and R. Steele, *Mobile radio communications*. Wiley, 1999.
- [8] J. Proakis, *DIGITAL COMMUNICATIONS*. McGraw Hill, 1995.
- [9] R. Salís, *Sistema de Radiodifusión, Radiocomunicaciones*, 2001.
- [10] D. K. Linder, *Introduction to Signals and Systems*. McGraw-Hill, 1999.
- [11] P. y. B. BANSAL, *Adaptive Loading in MIMO-OFDM Systems*. Stanford University, CA, EUA., 2001.

- [12] V. for OFDM, "Ieee communications magazine," *IEEE Communications Magazine*, 1998.
- [13] P. R. HARADA, H., *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*. Artech House, 2002.
- [14] "Second generation high-capacity broadband wireless solutions," 2003.
- [15] MINTEL. Ecuatorianos deben adquirir televisores con estándar isdbt-tb. [Online]. Available: <http://www.telecomunicaciones.gob.ec/ecuatorianos-deben-adquirir-televisores-con-estandar-isdbt-tb/>
- [16] MathWorks. The language of technical computing. [Online]. Available: http://es.mathworks.com/products/matlab/index-b.html?s_tid=gn_loc_drop

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

ACTA DE ENTREGA

El presente proyecto fue entregado en el Departamento de Eléctrica y Electrónica, y reposa en los archivos desde:

Sangolquí, _____ .

Elaborado por:

Christian Santiago López Cortez

Autoridad:

Ing. Darwin Alulema Msc.
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES