



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes
modulaciones usando Simulink**

AUTOR:

Anderson Andrés Uruchima Portilla

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

12 de Septiembre del 2016



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
Anderson Andrés Uruchima Portilla como requerimiento para la obtención
del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DE CARRERA

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 12 del mes de Septiembre del año 2016



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Uruchima Portilla, Anderson Andrés**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “**Análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones usando Simulink**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 12 del mes de Septiembre del año 2016

EL AUTOR

URUCHIMA PORTILLA, ANDERSON ANDRÉS



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Uruchima Portilla, Anderson Andrés**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones usando Simulink**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 12 del mes de Septiembre del año 2016

EL AUTOR

URUCHIMA PORTILLA, ANDERSON ANDRÉS

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento [Uruchima Andres Final.docx](#) (D21705055)

Presentado 2016-09-11 17:23 (-05:00)

Presentado por fernandopm23@hotmail.com

Recibido edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

Mensaje TT Andres Uruchima [Mostrar el mensaje completo](#)

4% de esta aprox. 15 páginas de documentos largos se componen de texto presente en 5 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques
Categoría	Enlace/nombre de archivo
	Tesis completa ANDRES URUCHIMA.docx
	tesis final - NV y JV.docx
	http://departamento.pucp.edu.pe/ingenieria/im...
	http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/6...
	http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/r...

1 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA

DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES TEMA:

Análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones usando Simulink

AUTOR: Anderson Andrés Uruchima Portilla

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES TUTOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando Guayaquil, Ecuador 12 de Septiembre del 2016

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DEDICATORIA

Dedico el trabajo de titulación a mi familia en general, a mi padre Abg. Joffre Uruchima Carrera, mi dedicatoria en personal que sin su ayuda no culminaría esto, y a mi madre, mi guerrera, Odrey Portilla Demera, que con sus consejos me han servido para poder culminar esta etapa de mi vida para superarme y así cumplir mis metas.

Mi ángel personal que me cuida desde el cielo mi abuelito, JAIME PORTILLA ALMENDARIZ, a mis hermanos, por siempre ayudarme y contar su apoyo en todo momento.

EL AUTOR

URUCHIMA PORTILLA, ANDERSON ANDRÉS

AGRADECIMIENTO

Agradecido eternamente a Dios por haberme guiado por el camino correcto toda mi vida estudiantil, dándome la sabiduría por haber terminado mis estudios de ingeniería en telecomunicaciones.

A mi familia por ser pilar fundamental para culminar mis metas, mi madre, que siempre de la mejor manera supo guiarme en el camino correcto y más sigue apoyándome en cada paso que doy de la forma correcta, a mi padre que sin el nada de esto tampoco fuera posible, por haber confiado plenamente en mí, para culminar mi objetivo.

A mi abuelita Mercedes Carrera por brindarme sus consejos ayudado así siempre corregirme al camino del bien siempre.

A mi gran amigo, Ing. Fernando Palacios por ayudarme con la información necesaria y su ayuda incondicional para realizar mi trabajo de titulación.

EL AUTOR

URUCHIMA PORTILLA, ANDERSON ANDRÉS



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

PALACIOS MELÉNDEZ EDWIN FERNANDO
PROFESOR

f. _____

ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS
DECANO

f. _____

HERAS SÁNCHEZ MIGUEL ARMANDO
DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

ZAMORA CEDEÑO NÉSTOR ARMANDO
OPONENTE

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen	XIV
CAPÍTULO 1: Descripción del Trabajo de Titulación	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Definición del problema.....	16
1.3. Justificación del problema.....	16
1.4. Objetivos	17
1.4.1. Objetivo General.....	17
1.4.2. Objetivos Específicos.....	17
1.5. Metodología de investigación.....	18
CAPÍTULO 2: Fundamentos teóricos de la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales	20
2.1. Orígenes de OFDM	20
2.2. Principios básicos de OFDM	22
2.3. Generación del sistema OFDM.....	24
2.4. Descripción matemática	26
2.5. Sistema de comunicaciones basado en OFDM.....	29
2.6. Parámetros de OFDM	34
2.7. Ventajas de OFDM.....	36
2.8. Aplicaciones de sistemas OFDM.....	37
CAPÍTULO 3: Simulación y comparación de sistemas OFDM con diferentes modulaciones.....	38
3.1. Modulación digital BPSK.....	38

3.1.1. Transmisor.....	39
3.1.2. Canal AWGN.....	43
3.1.3. Receptor.....	45
3.1.4. Instrumentos virtuales.....	48
3.2. Modulación digital QPSK.....	51
3.3. Modulación digital 16-QAM.....	53
3.4. Modulación digital 64-QAM.....	55
3.5. Resultados: comparación del desempeño.....	57
CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones.....	59
4.1. Conclusiones.....	59
4.2. Recomendaciones.....	60
Referencias Bibliográficas.....	61

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Comparación del uso del ancho de banda en (a) FDM y (b) OFDM	23
Figura 2. 2: Ejemplos del espectro OFDM: (a) un subcanal con una portadora (b) 5 portadoras	24
Figura 2. 3: Sistema de transmisión básico OFDM.....	25
Figura 2. 4: Sistema de recepción básico OFDM.....	26
Figura 2. 5: Transmisión punto a punto simplex usando OFDM.	29
Figura 2. 6: Prefijo cíclico en el símbolo OFDM.	32

Capítulo 3

Figura 3. 1: Simulación con modulación BPSK.....	39
Figura 3. 2: Transmisor con modulación BPSK.	39
Figura 3. 3: Ventana de configuración del generador de datos aleatorios... ..	40
Figura 3. 4: Constelación de la modulación BPSK.....	41
Figura 3. 5: Interior del bloque personalizado del modulador OFDM.....	42
Figura 3. 6: Ventana de configuración del bloque que agrega el prefijo cíclico	43
Figura 3. 7: Bloque para simular el canal de transmisión.....	44
Figura 3. 8: Ventana de configuración del bloque AWGN.....	44
Figura 3. 9: Receptor con modulación BPSK.....	45
Figura 3. 10: Demodulador de OFDM.....	45
Figura 3. 11: Ventana de configuración del bloque para remover el prefijo cíclico. Elaborado por: Autor	46
Figura 3. 12: Ventana de configuración del bloque demodulador BPSK.	47
Figura 3. 13: Espectrometro digital.	48
Figura 3. 14: (a) Espectro de la señal enviada (b) Espectro de la señal recibida	49
Figura 3. 15: (a) Bloque que obtiene el diagrama de la constelación (b) Diagrama de la constelación BPSK afectada por el ruido del canal.	50
Figura 3. 16: Calculador de BER.	51

Figura 3. 17: Transmisor con modulación QPSK.....	51
Figura 3. 18: (a) Ventana de configuración del modulador QPSK (b) Constelación de QPSK.....	52
Figura 3. 19: (a) Espectro de la señal enviada (b) Espectro de la señal recibida	53
Figura 3. 20: Transmisor con modulación 16-QAM.....	53
Figura 3. 21: (a) Ventana de configuración del modulador 16-QAM (b) Constelación de 16-QAM.....	54
Figura 3. 22: (a) Espectro de la señal enviada (b) Espectro de la señal recibida	55
Figura 3. 23: Transmisor con modulación 64-QAM.....	55
Figura 3. 24: (a) Ventana de configuración del modulador 64-QAM (b) Constelación de 64-QAM.....	56
Figura 3. 25: (a) Espectro de la señal enviada (b) Espectro de la señal recibida	57
Figura 3. 26: Tasas de bits erróneas obtenidas en los sistemas simulados para diferentes valores de señal a ruido.	58

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1: Parámetros estándar de OFDM.....	34
--	----

Resumen

La modulación multiportadora, particularmente la Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales (OFDM), ha sido aplicada con éxito en una gran variedad de tecnologías de comunicaciones digitales en los últimos años. OFDM ha sido elegida como el estándar para la capa física estándar de diversos sistemas importantes como IEEE 802.11 WLAN, 802.16 WMAN (Wimax), IEEE 802.22 WRAN, tecnologías celulares 3G y 4G, entre otras. Por tanto, sus fundamentos teóricos, algoritmos y técnicas de implementación siguen siendo temas de interés actual. En el presente trabajo se aborda la técnica de OFDM, comenzando desde sus orígenes. Se analizan sus fundamentos matemáticos, las principales características, parámetros usados y se resaltan sus ventajas. Además, se implementa en el programa de simulación Matlab/Simulink varios sistemas OFDM con diferentes modulaciones digitales como QPSK, 16-QAM y 64-QAM, y posteriormente se obtiene la tasa de bits erróneos (BER), en cada caso, para varios valores de relación señal a ruido.

Palabras claves: Modulación multiportadora, OFDM, sistema de comunicaciones

CAPÍTULO 1: Descripción del Trabajo de Titulación

1.1. Introducción

Las comunicaciones inalámbricas han tenido un enorme aumento en los últimos años. Las altas velocidades de transmisión requeridas en las tecnologías celulares, en las redes inalámbricas de área local (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Networks*) y el crecimiento exponencial de la Internet han dado lugar a un aumento de la demanda de nuevos métodos para la obtención de redes inalámbricas de alta capacidad, no solo en velocidades sino en utilización del ancho de banda y en robustez ante los efectos adversos que aparecen en el canal como los desvanecimientos selectivos de frecuencias, las multitrayectorias, las demoras de propagación, las interferencias de radiofrecuencia, etc.

Las redes móviles actuales de 3G y 4G, que proporcionan a los usuarios acceso a Internet de alta velocidad, así como otros servicios, están basadas en la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, del inglés *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Esta es una técnica de transmisión que consiste en la multiplexación de un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información que puede haber sido modulada con Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK, del inglés *Binary Phase Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Fase Cuaternaria (QPSK, del inglés *Quadrature Phase-Shift Keying*), Modulación de Amplitud en

Cuadratura (QAM, del inglés *Quadrature Amplitude Modulation*) de 16 ó 64 puntos en su constelación.

En redes móviles futuras se prevé lograr mayores velocidades de datos mediante el aumento de la cantidad de espectro asignado al servicio y por las mejoras en la eficiencia espectral. OFDM es un candidato potencial a ser usado en la capa física con el objetivo de cumplir estos aspectos.

1.2. Definición del problema.

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) es muy utilizado en la mayoría de sistemas de telecomunicaciones. Durante la formación de ingeniería en telecomunicaciones, se revisó OFDM de manera teórica, esto debido a que el costo de equipos tales como transmisores, receptores, entre otros es muy elevado. De acuerdo a lo planteado, surge la necesidad de realizar el análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones digitales usando el programa Simulink de MatLab.

1.3. Justificación del problema.

La mayoría de trabajos encontrados en revistas, tesis y proyectos de fin de carrera utilizan herramientas de simulación, en especial MatLab/Simulink. Aunque hay más plataformas para emular un sistema de telecomunicaciones.

El trabajo de titulación a desarrollar consiste en evaluar el desempeño de sistemas OFDM mediante las modulaciones digitales BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM usando el software MatLab/Simulink.

1.4. Objetivos

Por la importancia que tiene el estudio teórico de OFDM, así como la simulación de su funcionamiento, se describen tanto el objetivo general como los específicos.

1.4.1. Objetivo General.

El **objetivo general** del presente trabajo es:

- Analizar el desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones de M-PSK y M-QAM utilizando la plataforma de simulación MatLab/Simulink.

1.4.2. Objetivos Específicos.

Los **objetivos específicos** son:

- Estudiar los fundamentos teóricos de la técnica de modulación multiportadora OFDM.
- Implementar en Matlab/Simulink varios sistemas OFDM con diferentes modulaciones digitales de M-PSK y M-QAM.
- Evaluar el desempeño de la tasa de bits erróneos ante varios valores de relación señal a ruido, en cada caso.

1.5. Metodología de investigación.

Antes de describir la metodología de investigación que se utiliza en el trabajo de titulación, se definirá y explicará ciertos aspectos del conocimiento, ciencia y tecnología. En el texto de Arias, F. G. (2012) indica que “el conocimiento es un proceso que relacionan el sujeto que conoce, que percibe mediante sus sentidos, y el objeto conocido o percibido”.

Peña Cedillo (2009) sostiene que “la ciencia ha sido vista como la clave para la superación de los problemas de la humanidad. Además, manifiesta que co-existen por lo menos cinco afirmaciones acerca de la ciencia que la hacen aparecer como un dechado de virtudes tanto morales como materiales”. Mientras que Arias, F. G. (2012) indica que “la ciencia comprende conocimientos teóricos (ciencia básica o pura), o conocimientos prácticos que se emplean a corto plazo (ciencia aplicada)”

De acuerdo a lo descrito, podemos coincidir con lo manifestado por Arias, F. G. (2012), el conocimiento en si es la ciencia, mientras que la tecnología es parte aplicativa del conocimiento. Las telecomunicaciones evolucionan día a día, los avances tecnológicos en diferentes sistemas de comunicaciones han resuelto problemas y que siguen desarrollándose más investigaciones.

En relación a la metodología de investigación, tenemos que decidir el método de investigación, que para este trabajo es la simulación. Este

método es innovador y de aparición más reciente. Morles (2002) indica que el método de simulación permite “crear realidades virtuales, mediante computadoras u otros artefactos y observarlas y manipularlas a voluntad con el propósito de observar su comportamiento o efectos. Mediante este procedimiento se puede observar, el comportamiento de un sistema solar, un automóvil o una molécula”

CAPÍTULO 2: Fundamentos teóricos de la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales

En este Capítulo se analizan los fundamentos teóricos de la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, comenzando desde su surgimiento. Además, son abordados sus principios básicos, sus aplicaciones, las partes que conforman el sistema de comunicaciones, sus parámetros e finalmente sus ventajas.

2.1. Orígenes de OFDM

Los orígenes del desarrollo de OFDM comenzaron a finales de los años 1950 con la introducción de la Multiplexación por División de Frecuencias (FDM, del inglés *Frequency Division Multiplexing*) para comunicaciones de datos. En 1966 Chang patentó la estructura de OFDM y publicó el concepto del uso de señales multitono superpuestas ortogonales (Prasad, 2004).

En 1971, Weinstein y Ebert introdujeron la idea de usar la Transformada de Fourier Discreta (DFT, del inglés *Discrete Fourier Transform*) para la implementación de la generación y recepción de señales OFDM, eliminando la necesidad de los bancos de osciladores de subportadoras analógicas. Esto significó una alternativa de fácil implementación de OFDM, especialmente con el uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, del inglés *Fast Fourier Transform*), que es una implementación eficiente de la DFT (Prasad, 2004).

En la década de 1980, OFDM fue estudiado para su aplicación en módems de alta velocidad y comunicaciones móviles digitales. Uno de los sistemas utilizaba un tono piloto para la estabilización de la portadora y el control de la frecuencia del reloj. Además, se implementó la codificación de Trellis y se desarrollaron módems para redes telefónicas.

En 1990, OFDM comenzó a explotarse para comunicaciones de banda ancha a través de canales de radio FM móviles, líneas de abonado digital de alta tasa de bits (HDSL, del inglés *High-bit-rate Digital Subscriber Lines*) de 1,6 Mb/s, líneas de abonado digital asimétricas (ADSL, del inglés *Asymmetric Digital Subscriber Lines*) de hasta 6 Mb/s, líneas de abonado digital de alta velocidad (VHDSL, del inglés *Very High-speed Digital Subscriber Lines*) de 100 Mb/s, radiodifusión de audio digital (DAB, del inglés *Digital Audio Broadcasting*) y la radiodifusión terrestre de TV (HDTV, del inglés *High Definition Television*) (Prasad, 2004).

OFDM según Vikas & Singh (2013) se genera por la elección en primer lugar el espectro requerido, en base a los datos de entrada, y el esquema de modulación utilizado. Cada portador que se produce se le asigna algunos datos para transmitir. La amplitud requerida y la fase de la portadora A continuación se calcula sobre la base del esquema de modulación (normalmente diferencial BPSK, QPSK, o QAM).

Actualmente entre las tecnologías que usan OFDM pueden mencionarse: IEEE 802.11 a/b/g/n, también conocida como *Wireless LAN*, IEEE 802.16 WMAN conocida como WiMAX, IEEE 802.22 WRAN, el sistema de transmisión de datos de *Power Line Communications* (PLC), la telefonía móvil 4G LTE, entre otras.

2.2. Principios básicos de OFDM

OFDM es un caso especial de transmisión multiportadora, donde un flujo de datos se transmite a través de un número de subportadoras de tasa inferior. Es importante destacar que OFDM puede ser visto como una técnica de modulación o como una técnica de multiplexación. Una de las principales razones para el uso de OFDM es que aumenta la robustez frente al desvanecimiento selectivo de frecuencias o interferencias de banda estrecha.

En un sistema de una única portadora, un desvanecimiento o interferencia puede causar que todo el enlace falle, sin embargo, en un sistema multiportadora, sólo un pequeño porcentaje de las subportadoras se verán afectadas. Los códigos de corrección de errores pueden ser utilizados para corregir estos errores en las subportadoras (Prasad, 2004).

En un sistema clásico con FDM se divide el ancho de banda del canal en N subcanales y se transmiten múltiples señales en frecuencias portadoras separadas. Para garantizar que la señal de un subcanal no se

solape con la de un subcanal adyacente, se deja un espacio entre ellos, esto conduce a un uso ineficiente del espectro disponible. En el caso de OFDM, la separación entre subportadoras adyacentes es $1/T$, que es el mínimo para que éstas sean ortogonales, lo cual optimiza el aprovechamiento espectral y reduce la interferencia inter-símbolos (Agarwal & Agarwal, 2015).

En la figura 2.1 se ilustra gráficamente la diferencia entre FDM y OFDM. Con esta última se ahorra casi el 50% del ancho de banda. Podemos observar que OFDM es similar a FDM, pero mucho más eficiente espectralmente.

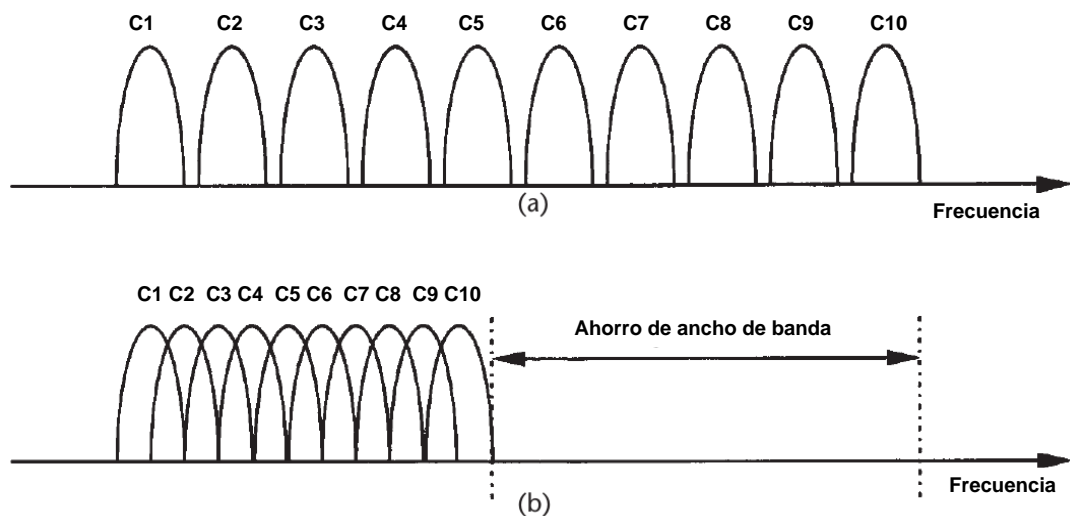


Figura 2. 1: Comparación del uso del ancho de banda en (a) FDM y (b) OFDM
Fuente: (Prasad, 2004)

En la figura 2.2 se muestra el espectro OFDM, en el caso de (b) es importante resaltar que en la frecuencia central de cada subcanal no existe interferencia de los otros subcanales. La clave de OFDM está en la

ortogonalidad de las señales, lo cual permite mezclar varias de ellas en transmisión para luego separarlas en el receptor, sin que exista interferencia.

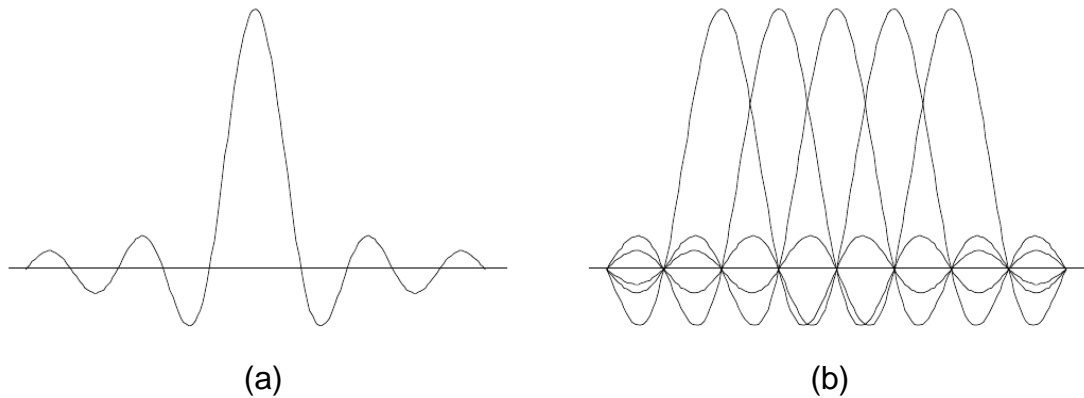


Figura 2. 2: Ejemplos del espectro OFDM: (a) un subcanal con una portadora (b) 5 portadoras

Fuente: (Matiaë, 1998)

De manera similar Vikas & Singh (2013) sostiene también que OFDM, es una técnica para la transmisión de datos en paralelo mediante el uso de un gran número de subportadoras moduladas. Estas subportadoras (o subcanales) dividen el ancho de banda disponible (véase la figura 2.2) y están suficientemente separadas en frecuencia (separación de frecuencias) de modo que son ortogonales.

2.3. Generación del sistema OFDM.

Para generar OFDM con éxito, Vikas & Singh (2013) indica que “las relaciones entre las portadoras deben ser cuidadosamente controlados para mantener la ortogonalidad de las portadoras. Por esta razón, OFDM se genera seleccionando en primer lugar el espectro requerido, en base a los datos de entrada, y esquema de modulación utilizado”.

La transformada rápida de Fourier (FFT) según Vikas & Singh (2013) convierte una señal de dominio de tiempo cíclico en su espectro de frecuencias equivalentes. Esto se hace mediante la búsqueda de la forma de onda equivalente, generada por una suma de componentes sinusoidales ortogonales. La amplitud y la fase de las componentes sinusoidales representan el espectro de frecuencia de la señal de dominio de tiempo.

La IFFT (transformada rápida inversa de Fourier) lleva a cabo el proceso inverso, la transformación de un espectro (amplitud y fase de cada componente) en una señal de dominio de tiempo. Una IFFT convierte un número de puntos de datos complejos, de la longitud que es una potencia de 2, en la señal en el dominio de tiempo del mismo número de puntos.

Las portadoras ortogonales necesarias para la señal OFDM pueden ser fácilmente generados mediante el establecimiento de la amplitud y fase de cada bin, a continuación, realiza la IFFT. Dado que cada bin de una IFFT corresponde a la amplitud y fase de un conjunto de sinusoides ortogonales, el proceso inverso garantiza que los portadores generados son ortogonales. En las figuras 2.3 y 2.4 se muestran los diagramas de bloques de los sistemas de transmisión y recepción OFDM.

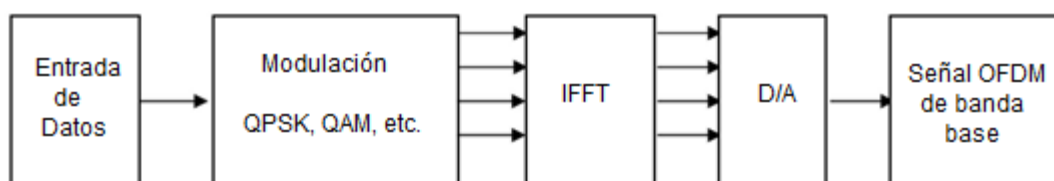


Figura 2. 3: Sistema de transmisión básico OFDM.

Fuente: (Vikas & Singh, 2013)

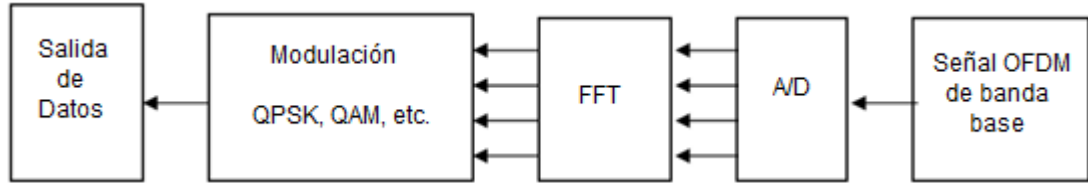


Figura 2. 4: Sistema de recepción básico OFDM.
Fuente: (Vikas & Singh, 2013)

2.4. Descripción matemática

Matemáticamente, cada portadora puede describirse como una onda compleja de la siguiente forma:

$$S_c(t) = A_c(t)e^{j[\omega_c t + \phi_c(t)]} \quad (1)$$

donde la señal real es la parte real de $S_c(t)$, $A_c(t)$ es la amplitud, $\omega_c = 2\pi f_c$ es la frecuencia y ϕ_c es la fase de la portadora.

OFDM consiste de múltiples portadoras, por tanto, el conjunto de señales complejas $S_s(t)$ pueden representarse por:

$$S_s(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n(t) e^{j[\omega_n t + \phi_n(t)]} \quad (2)$$

donde $\omega_n = \omega_0 + n \Delta\omega$, N es el número de portadoras. Esta es una señal continua. Si se considera las formas de onda de cada componente de la señal sobre un período de símbolo, entonces las variables $A_c(t)$ y $\phi_c(t)$, tomadas en valores fijos y que dependen de la frecuencia de la portadora en particular, puede reescribirse como:

$$\phi_n(t) \rightarrow \phi_n \quad A_n(t) \rightarrow A_n$$

Si la señal es muestreada utilizando una frecuencia de muestreo de $1/T$, entonces, la señal resultante discreta se representa por:

$$S_s(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j[(\omega_0+n\Delta\omega)kT+\varphi_n]} \quad (3)$$

En este punto, se ha restringido el tiempo durante el cual se analiza la señal a N muestras. Es conveniente realizar el muestreo en el período de un símbolo de datos, para lo cual tenemos la relación $t = NT$. Simplificando la ecuación 3, sin pérdida de generalidad, al hacer $\omega_0 = 0$, la señal se convierte en:

$$S_s(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j\varphi_n} e^{j(n\Delta\omega)kT} \quad (4)$$

Ahora la ecuación 4 puede compararse con la forma general de la Transformada inversa de Fourier:

$$g(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} G\left(\frac{n}{NT}\right) e^{j2\pi nk/N} \quad (5)$$

En la ecuación 4, el término $A_n e^{j\varphi_n}$, no es más que la definición de la señal en el dominio de la frecuencia de muestreo, y $S(kT)$ es la representación en el dominio del tiempo. Las ecuaciones 4 y 5 son equivalentes si:

$$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{1}{NT} \quad (6)$$

Esta es la condición requerida para la ortogonalidad. Por lo tanto, una consecuencia de mantener la ortogonalidad es que la señal de OFDM puede definirse mediante el uso de la Transformada de Fourier (Matiaë, 1998).

Detección de la información en el receptor:

Supongamos que por un canal ideal enviamos una señal compuesta por varias señales sinusoidales ortogonales:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) \tag{7}$$

Donde N es el número de señales, A_i contiene la información a transmitir y ω_i es la frecuencia de las subportadoras.

Para recuperar la subportadora de frecuencia ω_k basta con realizar la siguiente operación:

$$\int_0^T \cos(\omega_k t) s(t) dt = \int_0^T \cos(\omega_k t) \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) dt \tag{8}$$

Debido a que las señales son ortogonales, tenemos que:

$$\int_0^T \cos(\omega_k t) \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) dt = A_k \int_0^T \cos(\omega_k t) \cos(\omega_k t) dt = \frac{A_k T}{2} \tag{9}$$

Las ecuaciones anteriores demuestran que las múltiples subportadoras contenidas en la señal compuesta enviada al canal inalámbrico pueden ser separadas en el receptor calculando la integral, en un período, entre la señal

compuesta que llega y una senoide con frecuencia igual a la que queremos detectar, en cada caso. La diferencia de fase no es importante ya que la ortogonalidad no se ve afectada por la fase.

2.5. Sistema de comunicaciones basado en OFDM

En la figura 2.5 se muestra el diagrama en bloques de un sistema de transmisión punto a punto simplex usando OFDM y codificación con corrección de errores (FEC, del inglés *Forward Error Correction*).

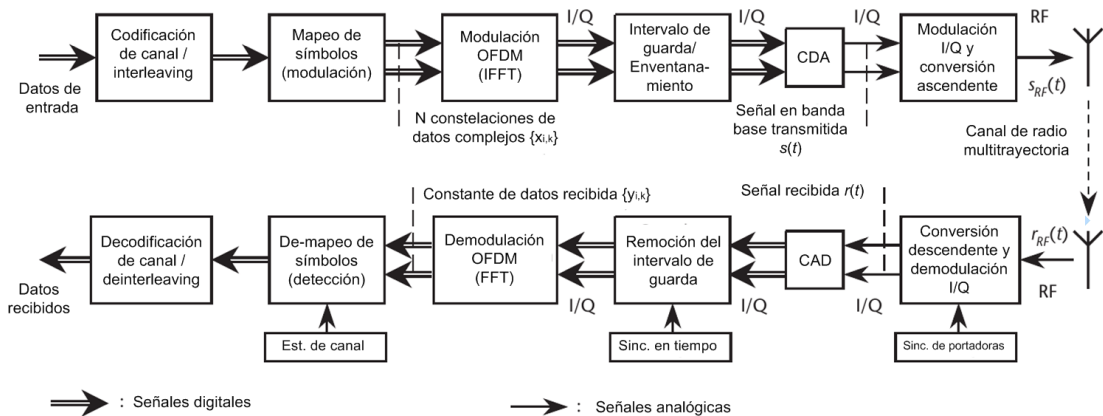


Figura 2. 5: Transmisión punto a punto simplex usando OFDM.

Fuente: (Prasad, 2004)

La codificación FEC y el entrelazado (en lo adelante *interleaving*) son procesos de vital importancia aplicados a los datos de entrada. Los sistemas OFDM que utilizan codificación con corrección de errores generalmente son denominados OFDM codificados (COFDM, do inglés *Coded OFDM*). Como su nombre indica, los errores en los bits transmitidos pueden ser corregidos en el decodificador.

Los desvanecimientos selectivos en frecuencia que surgen en el canal pueden afectar severamente los símbolos de datos transmitidos en una o varias subportadoras, dando lugar a errores en los bits. Generalmente estos errores afectan en ráfagas, o sea una secuencia de bits consecutivos. Cuando esto ocurre, se hace muy difícil la corrección de errores en el proceso de decodificación. Con el *interleaving*, los bits codificados se dispersan sobre el ancho de banda del sistema de transmisión, lo que permite que los errores que ocurran en los bits sean aleatorios, es decir, sin un orden específico. De esta forma un esquema de codificación eficiente puede corregir estos errores.

La modulación digital consiste en asociar a una portadora una amplitud y una fase de acuerdo a las combinaciones de bits de datos que entran al modulador. La ubicación de los símbolos en la constelación es conocida de antemano, así como el espectro correspondiente a cada uno de ellos. Las modulaciones usadas en OFDM son: BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

La IFFT y la FFT son usadas para modular y demodular las constelaciones de datos, creadas en la etapa anterior, sobre las subportadoras ortogonales, respectivamente. Estos algoritmos de procesamiento de la señal sustituyen los bancos de moduladores y demoduladores I/Q que se requerirían en caso de no existir esta herramienta matemática.

En la entrada de la IFFT están presentes N puntos de la constelación de datos $\{x_{i,k}\}$ (i es el índice de la subportadora, k es el índice del símbolo OFDM), donde N es el número de puntos de la FFT. Esas constelaciones pueden tomarse de acuerdo al conjunto de señalización producido, ya sea por la modulación por desplazamiento de fase o por la modulación de amplitud en cuadratura.

Las N muestras de salida de la IFFT, estando en el dominio del tiempo, forman la señal en banda base que lleva los símbolos de datos sobre las subportadoras ortogonales. Generalmente, se toma N como un número entero potencia de dos, permitiendo de esta forma la aplicación de los algoritmos IFFT y FFT con una alta eficiencia para la modulación y demodulación, respectivamente.

El canal inalámbrico es un canal multitrayectoria debido a las reflexiones y difracciones que sufre la onda electromagnética entre el emisor y el receptor, esto implica que la señal llega al receptor por diferentes caminos y con retardos diferentes (Ahmad R. S. Bahai, Burton R. Saltzberg, 2002). Este fenómeno provoca interferencias entre los símbolos, lo cual causa la pérdida de la ortogonalidad. Este problema es solucionado copiando la parte final del símbolo al principio de este, a lo que se denomina prefijo cíclico o intervalo de guarda. Su longitud debe superar la demora provocada por la propagación multitrayectoria en el canal (Peled & Ruiz, 1980).

El prefijo cíclico crea una banda de separación en el dominio del tiempo entre los símbolos, lo cual evita la interferencia inter-símbolo. Su inserción hace que la señal transmitida sea periódica, de esta forma, la dispersión en tiempo causada por las multitrayectorias del canal se vuelve equivalente a una convolución cíclica.

Debido a las propiedades de la convolución cíclica, el efecto del canal multitrayectoria se limita a una multiplicación punto a punto de las constelaciones de datos transmitidos por la función de transferencia del canal, o la Transformada de Fourier de la respuesta a impulso del canal; es decir, las subportadoras se mantienen ortogonales. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra gráficamente lo descrito hasta aquí.

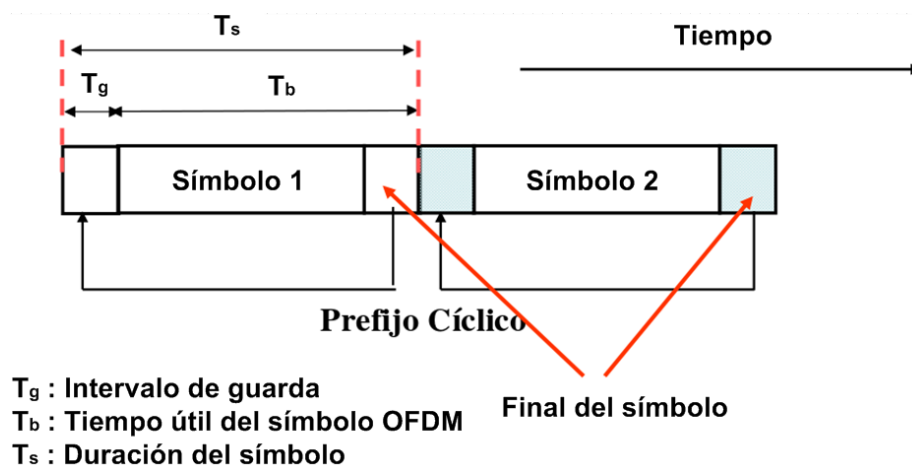


Figura 2. 6: Prefijo cíclico en el símbolo OFDM.

Elaborado por: Autor

El único inconveniente de esta técnica es que conlleva a una ligera pérdida de potencia de transmisión efectiva debido a la redundancia

introducida que es transmitida. Por lo general, el prefijo cíclico tiene una longitud de $1/10$ a $1/4$ del período del símbolo, lo que conduce a una pérdida de 0,5 a 1 dB en la relación señal a ruido (SNR, del inglés *Signal to Noise Ratio*). Sin embargo, este inconveniente es despreciable si tenemos en cuenta las múltiples ventajas y la robustez que le brinda al sistema. El prefijo cíclico es desechado en el receptor.

Las señales complejas en banda base son moduladas en fase y en cuadratura (I/Q, del inglés *in-phase/quadrature*) y convertidas de la forma adecuada para su transmisión por medio de una portadora de radiofrecuencia (RF). En el receptor se ejecutan los procesos inversos.

La ecualización (demapeo de los símbolos) requerida para la detección de las constelaciones de datos es una multiplicación elemento a elemento de la salida de la FFT por la inversa de la función de transferencia estimada del canal (estimación de canal). En el caso de los esquemas de modulación de fase, la multiplicación por el complejo conjugado de la estimación de canal puede hacer la ecualización.

La sincronización es un tema clave en el diseño de un receptor OFDM robusto. La sincronización en tiempo es fundamental para identificar el comienzo del símbolo OFDM. Por otro lado, la sincronización en frecuencia es importante para alinear la frecuencia del oscilador local en el modulador y en el demodulador. Si alguna de estas tareas de sincronización no se realiza

con la suficiente precisión se pierde, parcialmente, la ortogonalidad de las subportadoras, lo cual introduce interferencias inter-símbolos e inter-portadoras.

2.6. Parámetros de OFDM

En la Tabla 2.1 se presentan los principales parámetros de OFDM según (Prasad, 2004).

Tabla 2. 1: Parámetros estándar de OFDM

Tasa de datos	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
Modulación	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Tasa de codificación	1/2, 2/3, 3/4
Número de subportadoras	52
Número de pilotos	4
Duración del símbolo OFDM	4 μ s
Intervalo de guarda	800 ns
Espaciamiento entre subportadoras	312,5 kHz
Ancho de banda - 3 dB	16,56 MHz
Espaciamiento en el canal	20 MHz

Fuente: (Prasad, 2004)

En OFDM, las tasas de codificaciones usadas pueden variar, obteniéndose velocidades de transmisión de datos codificados desde 6 Mbps hasta 54 Mbps. La codificación convolucional se utiliza con la tasa estándar de la industria 1/2, una longitud restringida de 7 y polinomios generadores (133,171).

Con la perforación (*puncturing*) de bits del código de tasa 1/2 se pueden obtener mayores tasas de codificación, como por ejemplo de 2/3 y 3/4. La tasa de 2/3 se usa solo con la modulación 64-QAM para obtener una tasa de datos de 48 Mbps. La tasa de 1/2 se usa con BPSK, QPSK y 16-QAM para obtener tasas de 6, 12, y 24 Mbps, respectivamente. Finalmente, la tasa de 3/4 se usa con BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM para obtener tasas de 9, 18, 36, y 54 Mbps, respectivamente.

Mediante el uso de 48 subportadoras de datos, se pueden lograr velocidades de datos no codificados entre 12 y 72 Mbps usando diferentes modulaciones, desde BPSK hasta 64-QAM. Además de las 48 subportadoras de datos, cada símbolo OFDM contiene 4 subportadoras pilotos, que son utilizadas para seguir el desplazamiento de la frecuencia portadora residual que queda después de la corrección de frecuencia inicial durante la fase de formación del paquete.

La duración del símbolo escogida es 4 μ s para limitar la cantidad relativa de potencia y el tiempo dedicado al intervalo de guarda para 1 dB. Esto determina un espaciamiento de subportadoras de 312.5 kHz, lo cual es el inverso de la duración del símbolo menos el tiempo de guarda.

Un parámetro clave que determina en gran medida la elección de los otros parámetros es el intervalo de guarda de 800 ns, el cual proporciona robustez ante la demora de propagación de hasta varios cientos de

nanosegundos, dependiendo de la tasa de codificación y modulación usadas. En la práctica, esto significa que la modulación es lo suficientemente robusta como para ser utilizada en cualquier ambiente de interior, incluyendo grandes edificios de fábricas. También se puede utilizar en ambientes al aire libre, aunque pueden ser necesarias antenas direccionales para reducir la demora de propagación a una cantidad aceptable y aumentar el alcance.

2.7. Ventajas de OFDM

El esquema de transmisión OFDM tiene las siguientes ventajas:

- Alta eficiencia espectral y simplicidad en la implementación gracias al uso de la IFFT/FFT.
- OFDM es eficaz para enfrentar las multitrayectorias; para una determinada demora de propagación dada, la complejidad de implementación es significativamente menor que la de un sistema de portadora única con un ecualizador.
- En canales variables en el tiempo relativamente lentos, es posible mejorar su capacidad de forma significativa adaptando la tasa de datos por subportadora de acuerdo a la SNR de esa subportadora en particular.
- OFDM es robusta frente a las interferencias de banda estrecha debido a que estas solo afectan a un pequeño porcentaje de las subportadoras.
- OFDM posibilita las redes de frecuencia única, lo cual es atractivo especialmente en las aplicaciones de difusión (broadcasting).

2.8. Aplicaciones de sistemas OFDM.

En esta sección se exponen aplicaciones realizadas en los sistemas de transmisión usando OFDM. Según Enam, Islam, Rabbani, & Sarker (2012), los servicios inalámbricos multimedia requieren transmisión de alta velocidad de datos a través de canales de radio móvil. En otras palabras, la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), es ampliamente considerado como una opción prometedora para el futuro sistema de comunicaciones inalámbricas debido a su capacidad de transmisión de alta velocidad de datos con una alta eficiencia de ancho de banda.

En la investigación realizada por Liu, Noonpakdee, & Shimamoto (2011) OFDM, es una de las técnicas más populares para la comunicación inalámbrica de alta velocidad de datos y de gran interés para investigadores en universidades y laboratorios de investigación de todo el mundo. Para esta aplicación, tiene un esquema eficaz de transmisión de datos de alta velocidad sin necesidad de utilizar ecualizadores muy caros y se ha propuesto como la interfaz de aire para aplicaciones inalámbricas de banda ancha.

CAPÍTULO 3: Simulación y comparación de sistemas OFDM con diferentes modulaciones.

En este capítulo se desarrollan, en MatLab/Simulink, varias simulaciones del sistema OFDM utilizando 4 tipos de modulaciones diferentes donde se ha variado la relación señal ruido del canal para calcular la tasa de bits erróneos en cada caso. Se analizarán los bloques del primer esquema de modulación utilizando BPSK, tanto el transmisor como el receptor. En los demás esquemas presentados, será explicado solo el modulador y mostrada su constelación.

3.1. Modulación digital BPSK.

En la figura 3.1 se muestra el sistema de comunicaciones simulado, en este caso se utiliza la modulación BPSK, la más simple y de menor tasa de transferencia de bits, que gracias a su mapeamiento binario en la constelación es la más robusta ante ruidos.

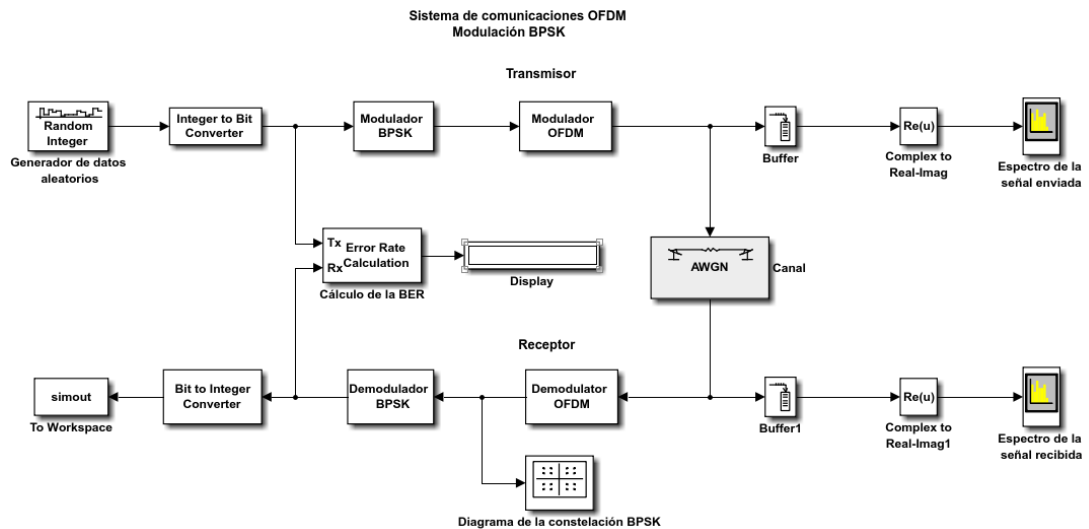


Figura 3. 1: Simulación con modulación BPSK.

Elaborado por: Autor

3.1.1. Transmisor

En la figura 3.2 se muestra el transmisor del sistema, los bloques que lo componen serán descritos en el presente epígrafe.

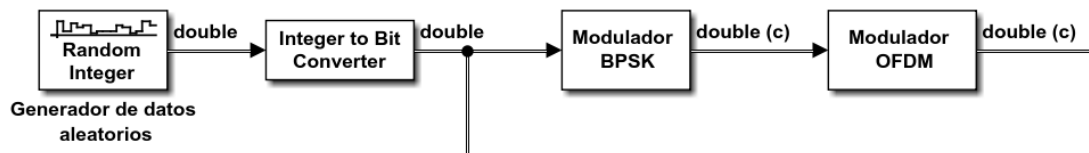


Figura 3. 2: Transmisor con modulación BPSK.

Elaborado por: Autor

❖ Generador de datos aleatorios

Para generar los datos que serán transmitidos se utilizó un generador de datos enteros aleatorios, la configuración utilizada se muestra en la Figura 3.3. El parámetro *M-ary number* es igual al número de puntos que tenga la constelación utilizada en el modulador del transmisor, que en este caso es BPSK, por lo que el parámetro toma valor 2. El parámetro *Initial*

seed es el valor de la semilla inicial para la generación de los números pseudo-aleatorios. Los parámetros *Sample time* y *Samples per frame* están relacionados. Ellos fueron configurados de manera que se envíen tramas de 192 datos por segundo, el valor se escogió de forma que al aumentar la trama con las subportadoras pilotos, las subportadoras de banda guarda y de corriente directa, el valor que entre al modulador de OFDM sea 256 ya que es más eficiente que este trabaje con una cantidad de subportadoras potencia de 2.

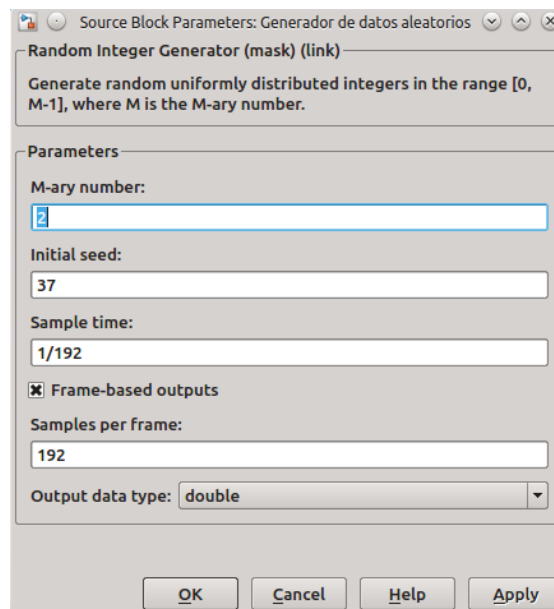


Figura 3. 3: Ventana de configuración del generador de datos aleatorios.

Elaborado por: Autor

❖ *Integer to bit Converter* (conversor de entero a binario)

Las modulaciones utilizadas en el esquema de modulación OFDM son modulaciones digitales por lo que los datos que reciben estos moduladores tienen que ser digitales. Dado que el generador de datos utilizados devuelve números enteros la función que realiza el bloque *Integer to bit converter* es

recibir datos enteros y convertirlos a datos binarios para alimentar los moduladores digitales.

❖ Modulador BPSK

Este bloque del Simulink recibe un flujo de datos binarios y mapea la información usando el esquema de modulación digital BPSK. En la figura 3.4 se muestra el diagrama de la constelación de este modulador.

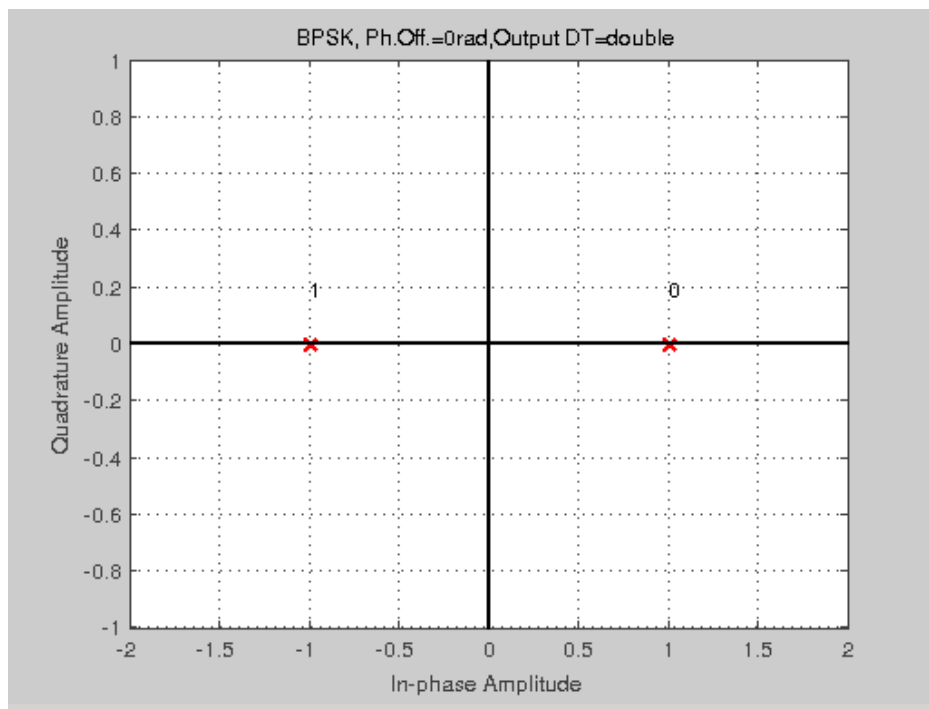


Figura 3. 4: Constelación de la modulación BPSK.

Elaborado por: Autor

❖ Modulador OFDM

El Modulador OFDM es un subsistema personalizado que contiene dentro un conjunto de bloques que permiten la simulación del esquema OFDM. En la figura 3.5 puede observarse la estructura interna del mismo.

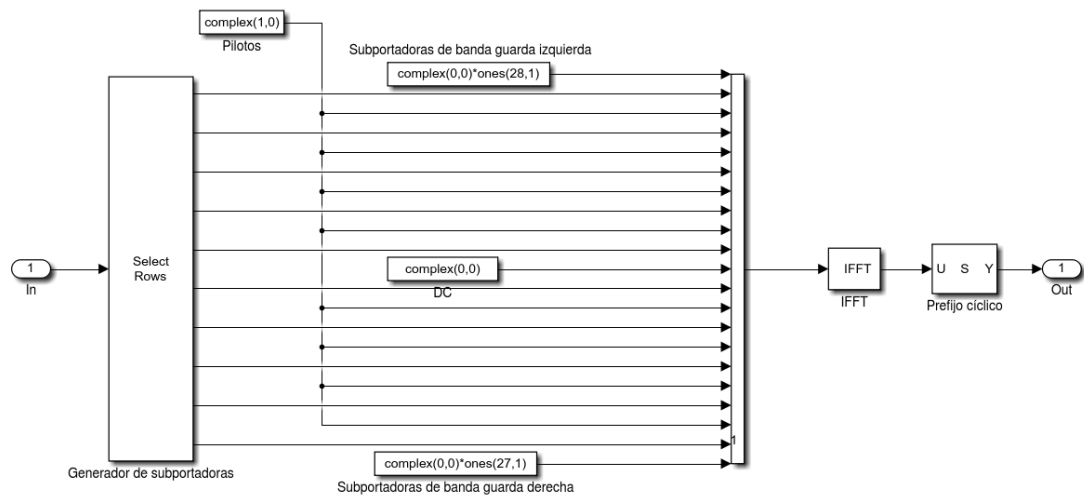


Figura 3. 5: Interior del bloque personalizado del modulador OFDM.

Elaborado por: Autor

El bloque Generador de subportadoras es básicamente un conversor serie-paralelo que toma el flujo de bits que proviene de la etapa anterior y lo transforma en 10 subcanales con sus varias subportadoras cada uno. Estos 10 conjuntos de subportadoras se combinan con 8 pilotos, los cuales son empleados para propósitos de estimación (Enríquez, Ortiz, & Ahmed, 2013), 28 subportadoras de banda guarda izquierda, 1 subportadora de DC y 27 subportadoras de banda guarda derecha, dando un total de 256 subportadoras.

El número de subportadoras de entrada al bloque de la IFFT se escoge como potencia de 2 para lograr la máxima eficiencia de este algoritmo matemático. Estas 256 subportadoras pasan por un conversor paralelo-serie antes de entrar en el bloque IFFT, el cual es el encargado de garantizar la

ortogonalidad entre las subportadoras, que es el principio básico de la modulación OFDM.

Para evitar la interferencia inter-símbolos y eliminar los efectos de las demoras de propagación del canal, se agrega un prefijo cíclico de 1/4 de la duración del símbolo OFDM, o sea, 64 muestras. En la figura 3.6 se muestra la ventana de configuración del bloque encargado de agregar el prefijo cíclico.

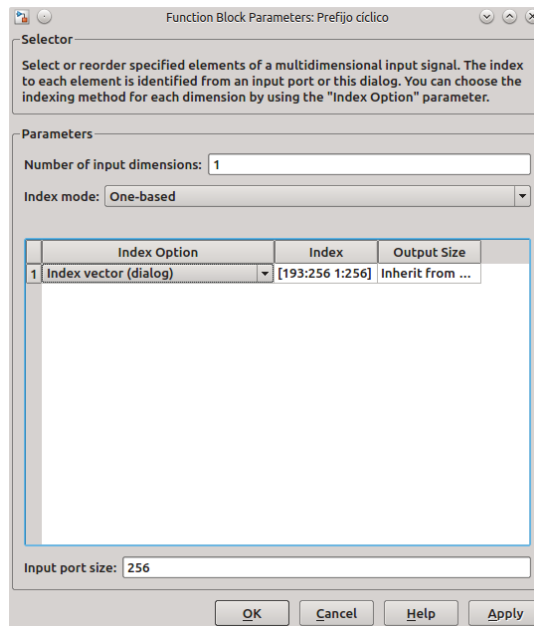


Figura 3. 6: Ventana de configuración del bloque que agrega el prefijo cíclico

Elaborado por: Autor

3.1.2. Canal AWGN.

Para simular el canal de transmisión se utiliza el bloque AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), el cual genera ruido que se adiciona a cualquier ruido intrínseco del sistema, que tiene una potencia uniforme sobre toda la banda de frecuencia y que es gaussiano porque sigue una

distribución normal en el dominio del tiempo. En la figura 3.7 se muestra el diagrama de bloque del canal de ruido aditivo blanco gaussiano.

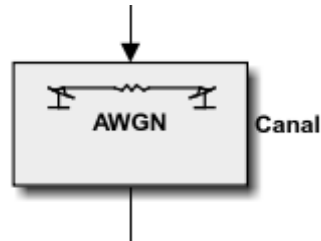


Figura 3. 7: Bloque para simular el canal de transmisión.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.8 se muestra la ventana de configuración del bloque AWGN.

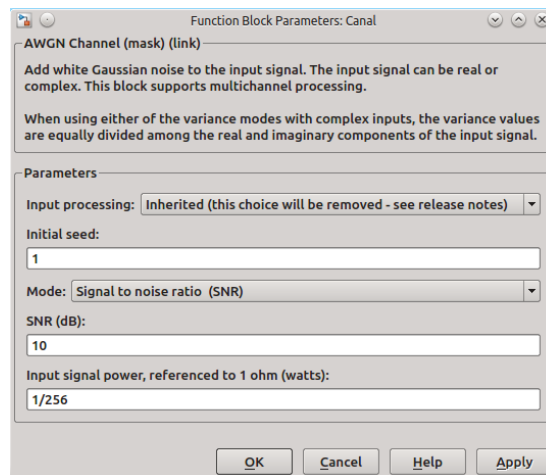


Figura 3. 8: Ventana de configuración del bloque AWGN.

Elaborado por: Autor

El valor de relación señal a ruido se encuentra fijado en 10 dB, posteriormente se experimenta con diferentes valores de relación señal ruido para observar el comportamiento del sistema.

3.1.3. Receptor

En la Figura 2.9 se muestra el receptor del sistema, los bloques que lo componen serán descritos en el presente epígrafe iniciando de derecha a izquierda. En el receptor se van realizando las operaciones inversas a las del transmisor, de manera que al final recuperemos el flujo de datos enteros que fue transmitido.

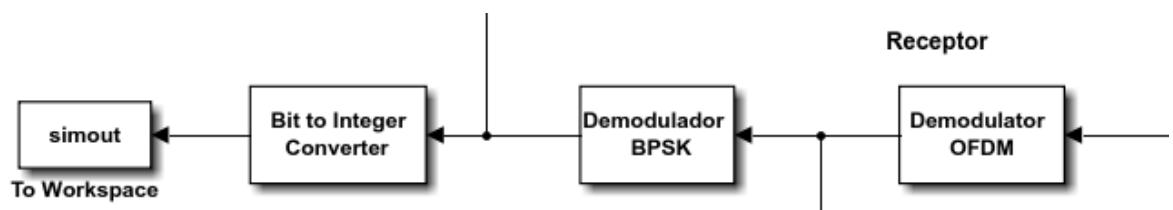


Figura 3. 9: Receptor con modulación BPSK.

Elaborado por: Autor

❖ Demodulador OFDM

Este es un bloque personalizado que contiene dentro un conjunto de bloques conectados de manera tal que a la entrada se reciba un símbolo OFDM y a la salida se obtenga un flujo de datos listo para entrar en el demodulador de BPSK. En la figura 3.10 se muestra el interior del bloque demodulador de OFDM.

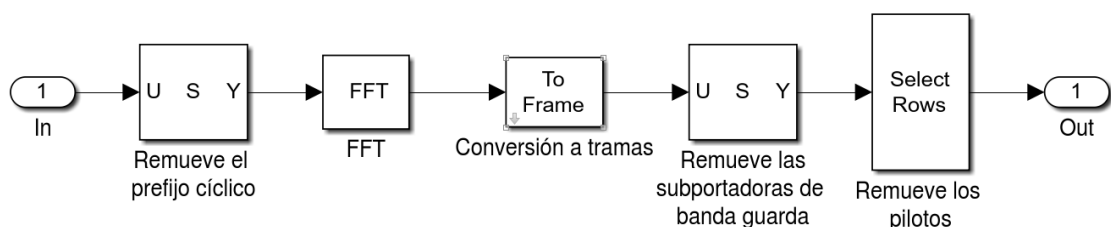


Figura 3. 10: Demodulador de OFDM.

Elaborado por: Autor

La primera operación es la remoción del prefijo cíclico utilizando un bloque seleccionador cuya configuración se muestra en la figura 3.11.

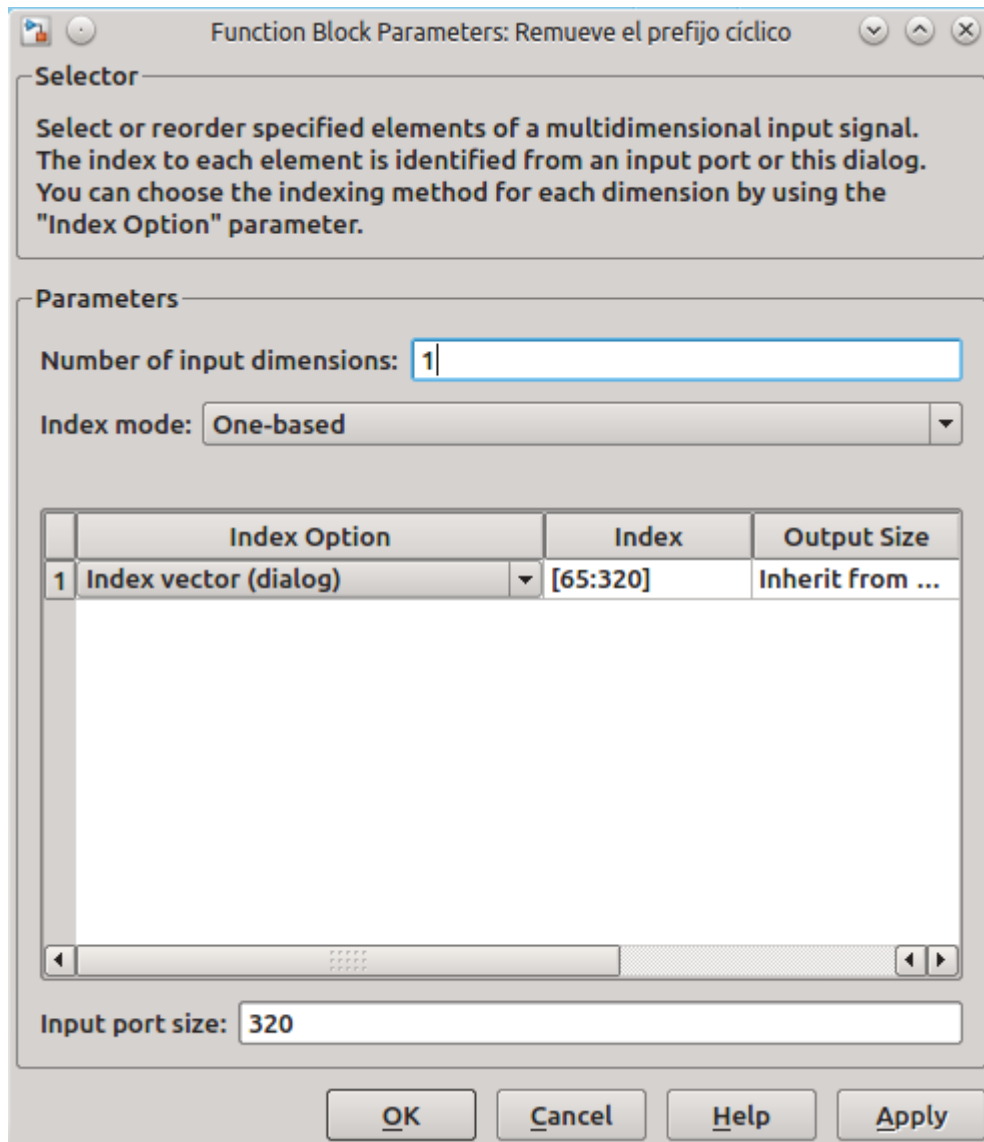


Figura 3. 11: Ventana de configuración del bloque para remover el prefijo cíclico.

Elaborado por: Autor

Luego los símbolos van al bloque FFT el cual es el encargado de transformar el símbolo OFDM en 256 subportadoras de las cuales 8 son subportadoras piloto, 27 son de banda guarda derecha, 1 de DC, 28 de bandaguarda izquierda y el resto son subportadoras de datos divididas en 10

subcanales. El siguiente bloque llamado “Conversión a tramas” convierte el flujo de datos entrante en tramas con tamaño de 256.

Los últimos 2 bloques son utilizados para remover las subportadoras de banda guarda y las subportadoras pilotos, estos son bloques selectores que extraen los datos para finalmente enviarlos a la salida del bloque personalizado.

❖ Demodulador BPSK

Este bloque es el encargado de demodular la información recibida, en este caso mapeada usando una constelación BPSK, para así obtener a la salida un flujo de datos binarios. En la figura 3.12 se muestra la ventana de configuración del demodulador de BPSK.

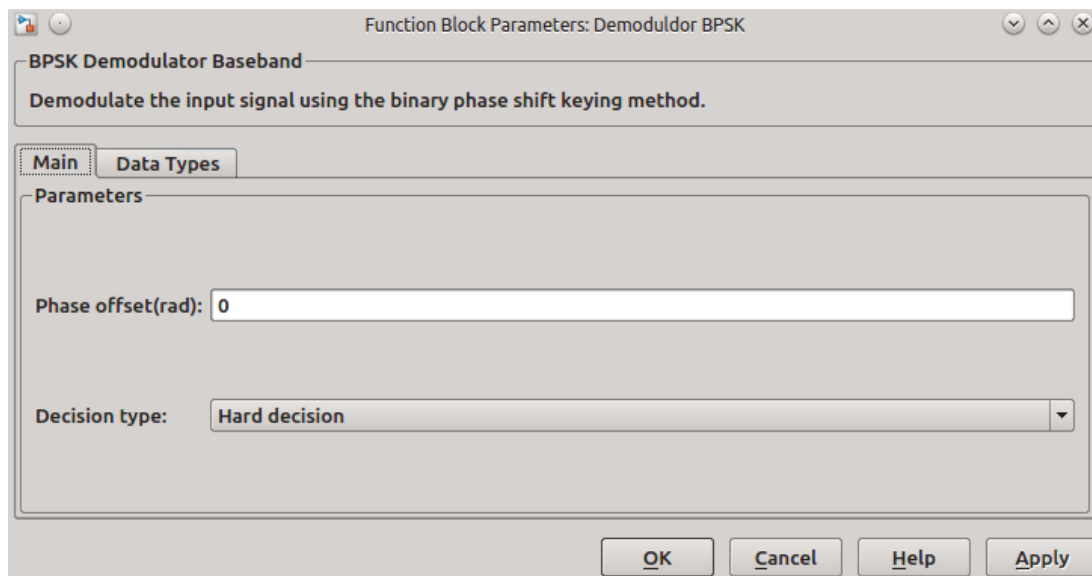


Figura 3. 12: Ventana de configuración del bloque demobulador BPSK.

Elaborado por: Autor

❖ *Bit to integer Converter* (conversor de binario a entero)

Este módulo básicamente lo que hace es convertir los datos de binarios a enteros para que finalmente lleguen en el formato que fueron enviados.

❖ *To Workspace*

Este módulo envía los datos enteros a una variable del *workspace* de Matlab llamada “simout” la cual puede ser utilizada para propósitos de comparación de los datos enviados y los recibidos.

3.1.4. Instrumentos virtuales

En este apartado se abordarán brevemente los instrumentos virtuales utilizados en las simulaciones.

❖ Espectrómetro digital

En la Figura 2.13 se muestran los bloques asociados al espectrómetro digital donde tenemos un bloque Buffer que convierte las muestras en un flujo de salida de muestreo lento, luego un Bloque que extrae la parte real del espectro. Finalmente, el espectrómetro que permite observar la señal en el dominio de la frecuencia.

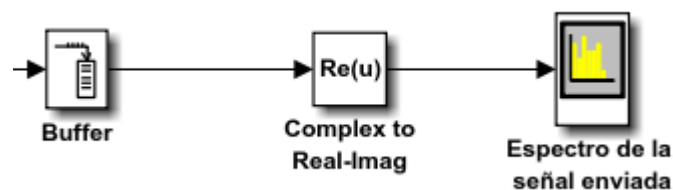


Figura 3. 13: Espectrometro digital.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.14 (a) se muestra el espectro de la señal enviada y en (b) el espectro de la señal recibida.

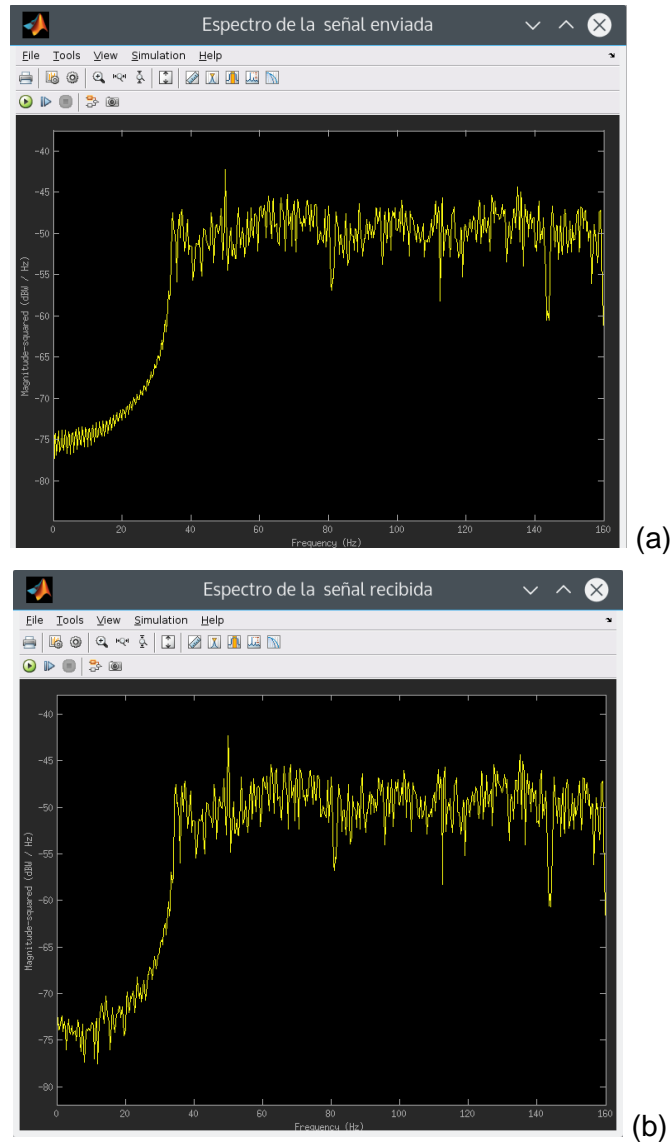


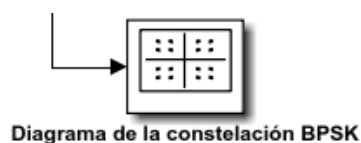
Figura 3. 14: (a) Espectro de la señal enviada (b) Espectro de la señal recibida
Elaborado por: Autor

Como se puede observar, la señal se encuentra en banda base, esto se debe a que en nuestra simulación no se trasladó el símbolo OFDM a frecuencias superiores de RF, por ejemplo 2.4 GHz (frecuencia muy utilizada por sistemas OFDM debido a que es una banda de transmisión libre

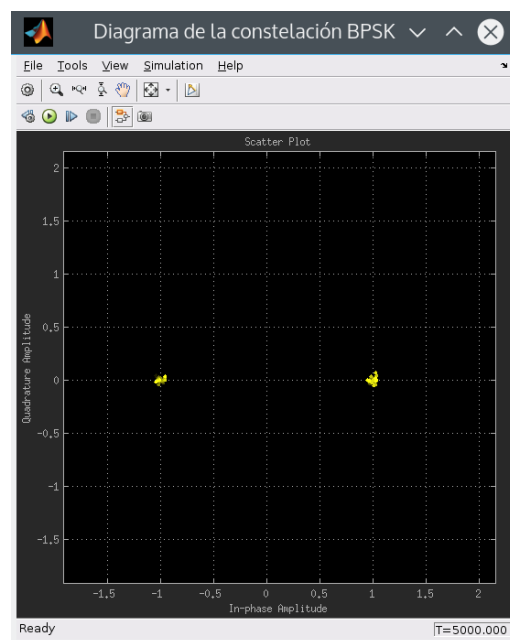
internacionalmente) porque esto requeriría una frecuencia de muestreo de $1/(2,4 \times 10^9)$ lo cual es un valor excesivamente grande que no es soportado por los computadores personales de hoy en día. A pesar de eso, la simulación permite comprender el funcionamiento de OFDM. Además, la simulación del canal con ruido blanco gaussiano aditivo significa que se afectan todas las frecuencias por igual.

❖ Diagrama de la constelación

Este bloque muestra el diagrama de la constelación recibida en el receptor, en la figura 3.15 se muestra el caso de BPSK. Se observa una leve dispersión, debido al ruido del canal.



(a)



(b)

Figura 3. 15: (a) Bloque que obtiene el diagrama de la constelación (b) Diagrama de la constelación BPSK afectada por el ruido del canal.

Elaborado por: Autor

❖ Calculador de Tasa de bits erróneos

En la figura 3.16 se muestra el bloque que computa el valor de la tasa de bits erróneos (BER, del inglés *Bits Error Rate*), el cual es mostrado con la ayuda de un bloque Display.

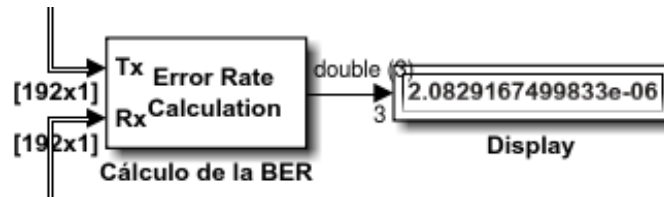


Figura 3. 16: Calculador de BER.

Elaborado por: Autor

3.2. Modulación digital QPSK.

En la figura 3.17 se muestra el sistema de comunicaciones con modulación QPSK.

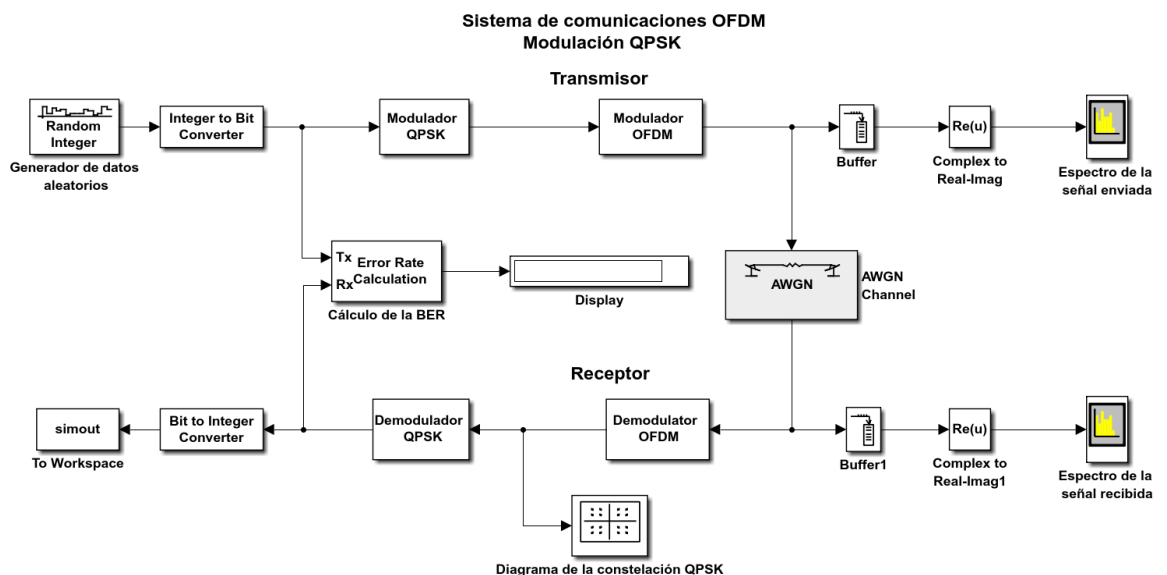


Figura 3. 17: Transmisor con modulación QPSK.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.18 (a) se muestra la ventana de configuración del modulador QPSK para obtener una constelación como la mostrada en (b).

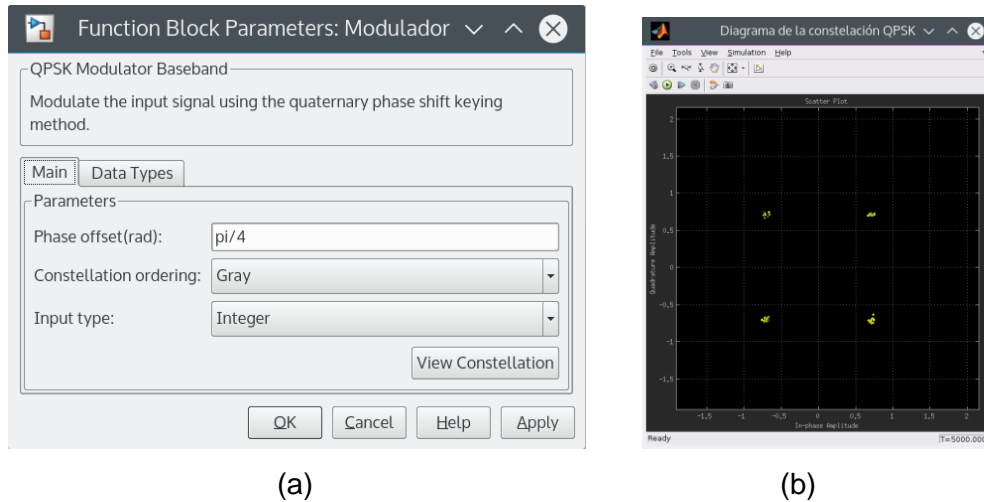
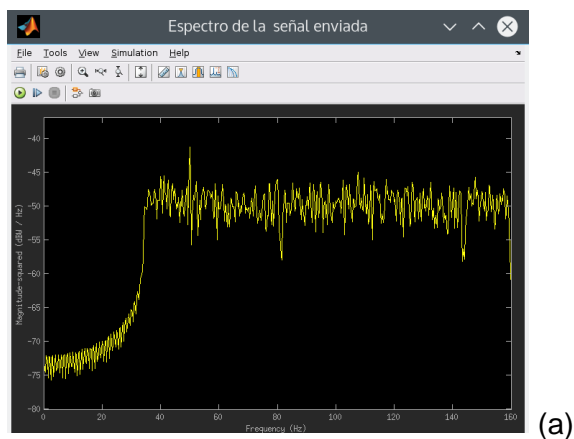


Figura 3. 18: (a) Ventana de configuración del modulador QPSK (b) Constelación de QPSK.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.19 (a) y (b) se muestran los espectros de la señal enviada y recibida, respectivamente.



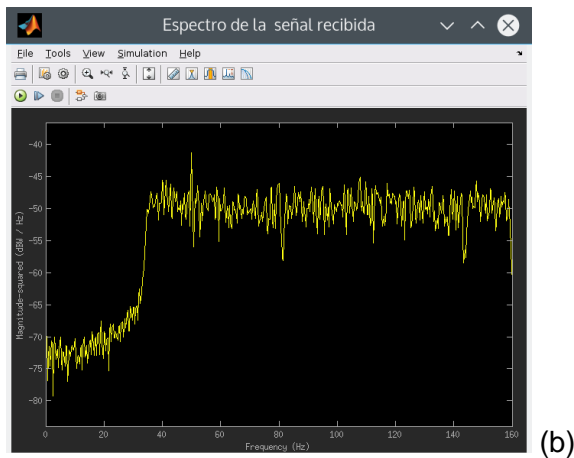


Figura 3. 19: (a) Espectro de la señal enviada (b) Espectro de la señal recibida
Elaborado por: Autor

3.3. Modulación digital 16-QAM.

En la figura 3.20 se muestra el sistema de comunicaciones con modulación 16-QAM.

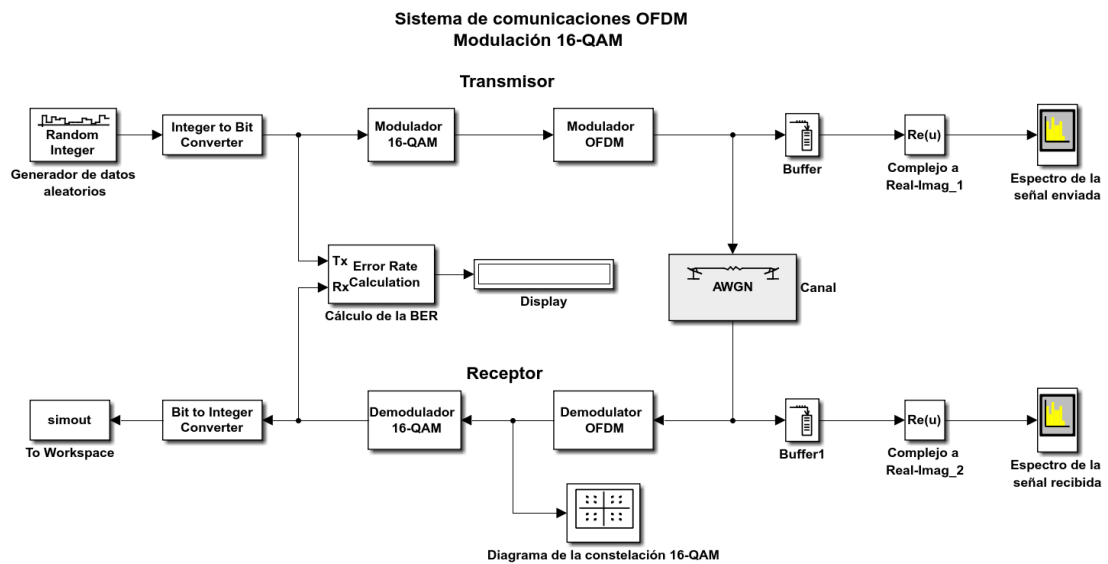


Figura 3. 20: Transmisor con modulación 16-QAM.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.21 (a) se muestra la ventana de configuración del modulador 16-QAM para obtener una constelación como la mostrada en (b).

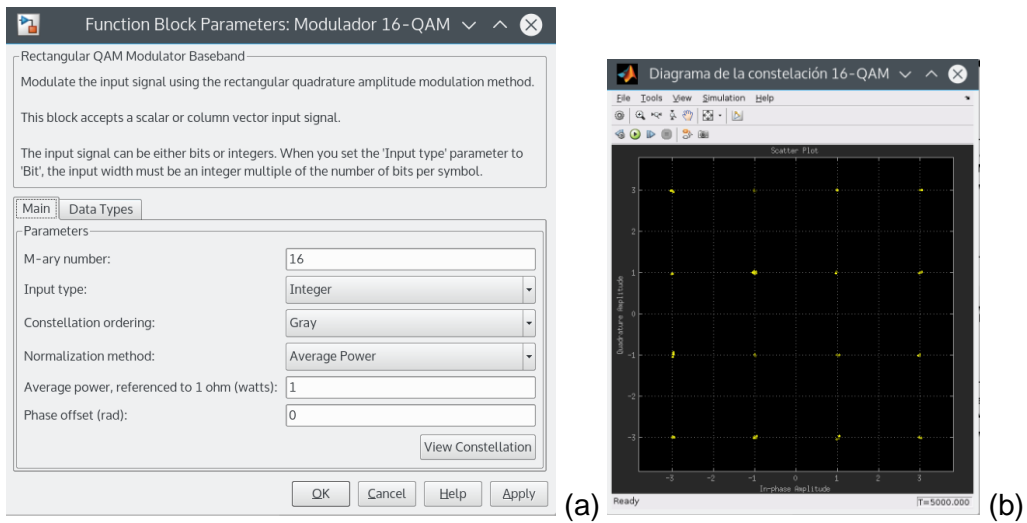
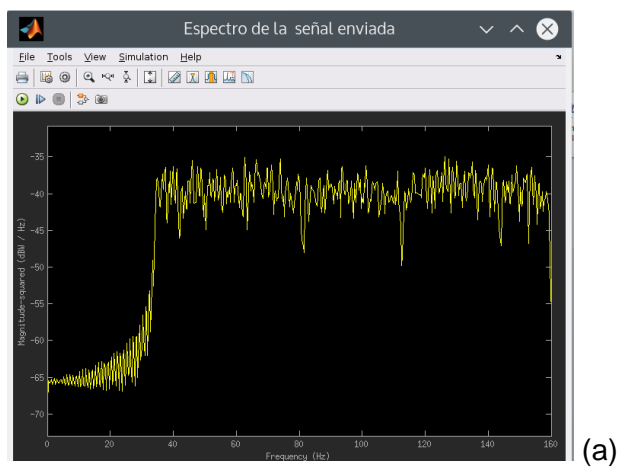


Figura 3. 21: (a) Ventana de configuración del modulador 16-QAM (b) Constelación de 16-QAM.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.22 (a) y (b) se muestran los espectros de la señal enviada y recibida, respectivamente.



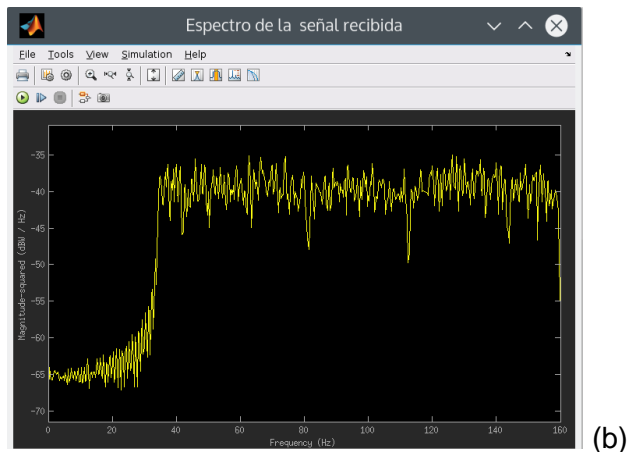


Figura 3. 22: (a) Espectro de la señal enviada (b) Espectro de la señal recibida

Elaborado por: Autor

3.4. Modulación digital 64-QAM.

En la figura 3.23 se muestra el sistema de comunicaciones con modulación 64-QAM.

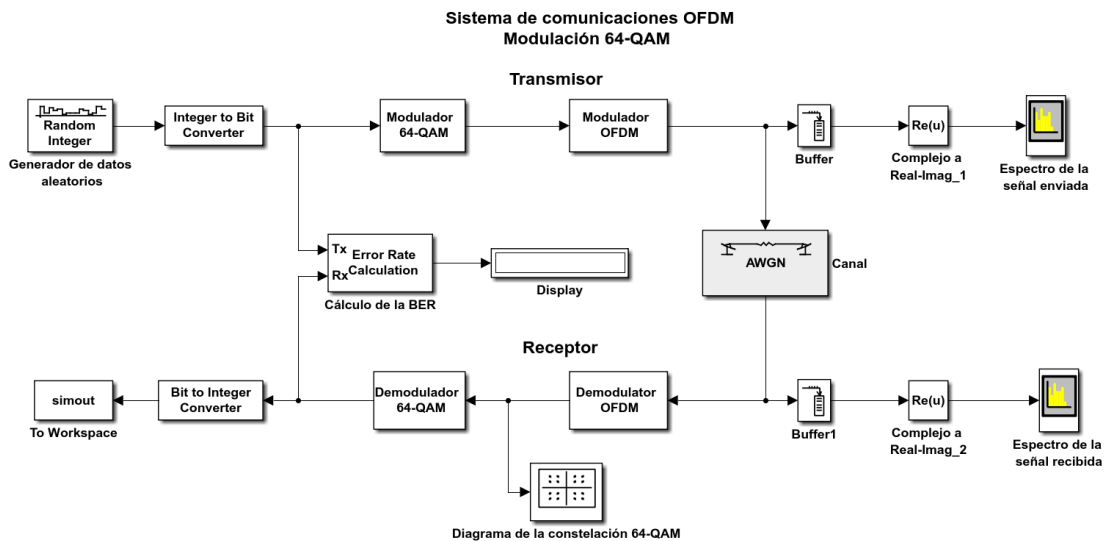


Figura 3. 23: Transmisor con modulación 64-QAM.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.23 (a) se muestra la ventana de configuración del modulador 64-QAM para obtener una constelación como la mostrada en (b).

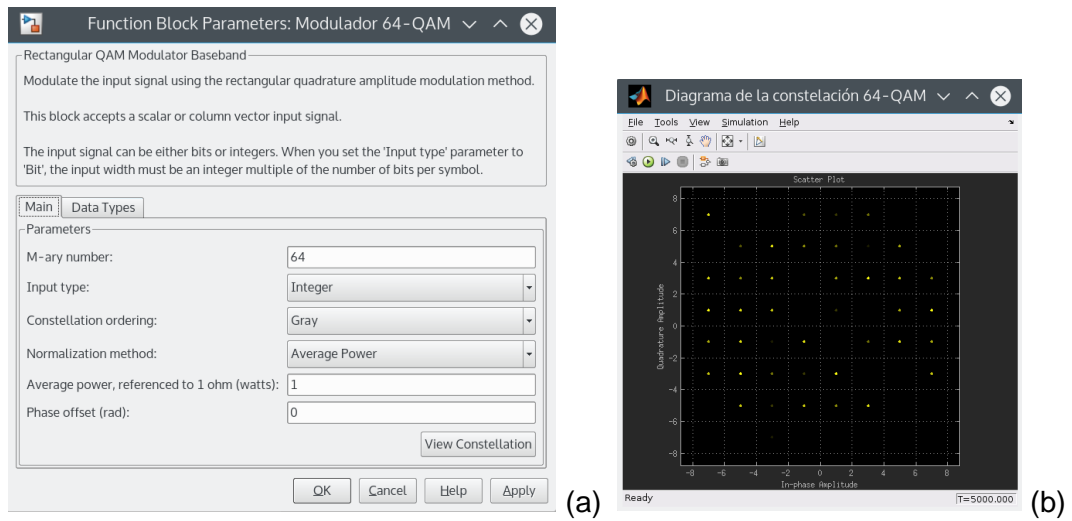
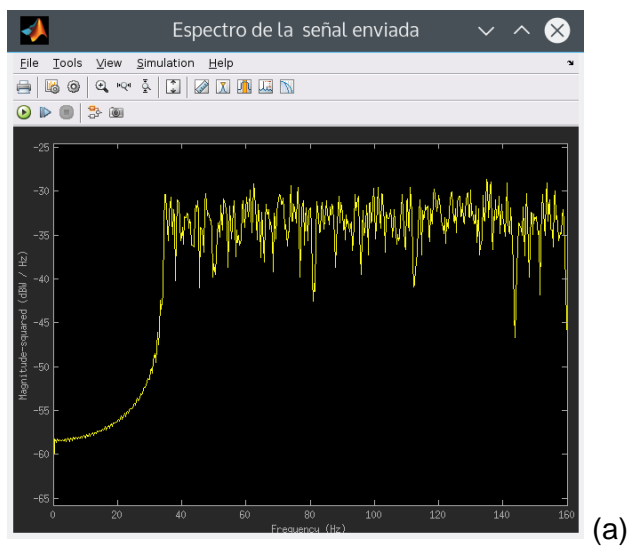


Figura 3. 24: (a) Ventana de configuración del modulador 64-QAM (b) Constelación de 64-QAM.

Elaborado por: Autor

En la figura 3.25 (a) y (b) se muestran los espectros de la señal enviada y recibida, respectivamente.



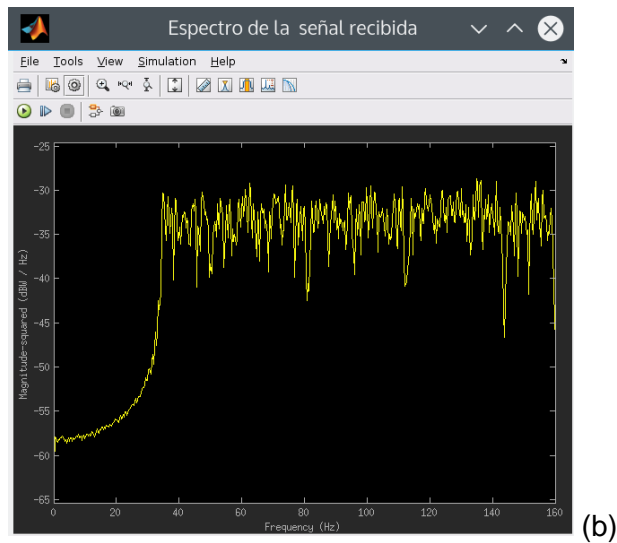


Figura 3. 25: (a) Espectro de la señal enviada (b) Espectro de la señal recibida
Elaborado por: Autor

3.5. Resultados: comparación del desempeño.

En la figura 3.26 se muestra una gráfica con las tasas de bits erróneos obtenidas en los sistemas simulados para diferentes valores de relación señal a ruido. Se puede observar que se obtuvieron menores valores de BER para BPSK y los mayores para 64-QAM. Esto sucede porque a medida que aumenta el nivel de modulación, se aumenta la eficiencia espectral, sin embargo, el espaciamiento entre amplitud y fase entre símbolos adyacentes disminuye. Debido a esto, el mismo ruido produce mayores errores en modulaciones con constelaciones más densas que en el caso de modulaciones más simples como BPSK.

En resumen, las constelaciones de mayor eficiencia espectral como 16 y 64 QAM son menos robustas al ruido del canal que en el caso de modulaciones más simples como BPSK y QPSK.

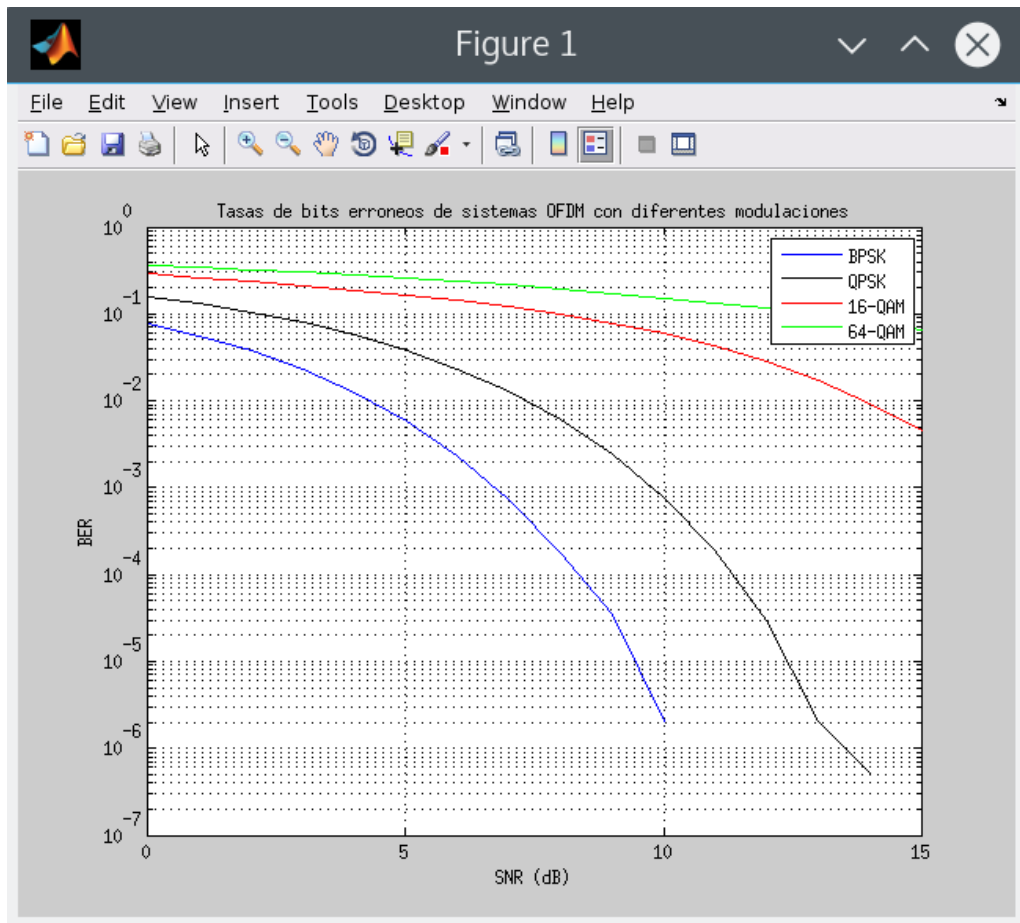


Figura 3. 26: Tasas de bits erróneos obtenidas en los sistemas simulados para diferentes valores de señal a ruido.

Elaborado por: Autor

Si al sistema simulado se le incorporan los procesos de codificación convolucional y de *interleaving* en el transmisor y de decodificación de Trellis y de deinterleaving en el receptor, los valores de BER deben ser aún menores. Esta comparación se recomienda para trabajos futuros.

CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones.

4.1. Conclusiones.

- En este trabajo se realizó un estudio de los fundamentos teóricos de la Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales, la cual se ha convertido en un esquema de modulación multiportadora popular para las comunicaciones digitales de banda ancha. A través del estudio de sus orígenes se pudo apreciar cómo fue evolucionando y el importante rol que desempeñan los algoritmos de la IFFT y la FFT, para lograr de forma eficiente la implementación de la ortogonalidad entre las subportadoras, lo cual es la característica principal de OFDM.

- Además, fueron abordados sus principios básicos de operación, las características y funcionamiento de un sistema de comunicaciones OFDM. Vimos que esta técnica resalta por su alta eficiencia espectral, logrando un considerable ahorro del ancho de banda en comparación con la FDM, y por su robustez frente a la interferencia co-canal de banda estrecha, las interferencias inter-símbolo y el desvanecimiento causado por la propagación multitrayectoria.

- El estudio de los contenidos mencionados anteriormente permitió la implementación en Matlab/Simulink de un sistema de comunicaciones OFDM con varios tipos de modulaciones digitales:

BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Para cada uno de ellos fue obtenida la tasa de bits erróneos en función de diferentes valores de relación señal a ruido. Las modulaciones más robustas ante los errores resultaron ser BPSK y QPSK.

4.2. Recomendaciones.

En las asignaturas del área de telecomunicaciones utilizar plataformas de simulación, así como adquirir licencias profesionales académicas que servirán para que los estudiantes de ingeniería en telecomunicaciones en conjunto con sus tutores puedan hacer un buen uso de programas de simulación.

En un futuro, este trabajo puede llevarse a cabo para obtener el rendimiento para OFDM con diferentes tipos de canales de comunicación, así como las mismas o diferentes técnicas de modulación. Otro estudio, puede ser también usar diferentes tipos de técnicas de estimación de canal se pueden implementar en MatLab/Simulink o LabView para evaluar el rendimiento de OFDM.

Referencias Bibliográficas

- Agarwal, A., & Agarwal, K. (2015). Implementation and Performance Evaluation of OFDM System in Diverse Transmission Channel Using Simulink. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 3(5), 117–123.
- Ahmad R. S. Bahai, Burton R. Saltzberg, M. E. (2002). *Multi-Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM*. New York, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica. 6ta. Edición*. Fidas G. Arias Odón.
- Enam, F., Islam, A., Rabbani, A., & Sarker, S. (2012). Performance Evaluation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) based Wireless Communication System with implementation of Least Mean Square Equalization technique. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 10(11), 28–32.
- Enríquez, A., Ortiz, J. H., & Ahmed, B. T. (2013). *Banda Ancha Inalámbrica: WiMAX*. Omnia Sciences.
- Liu, J., Noonpakdee, W., & Shimamoto, S. (2011). Design and Performance Evaluation of OFDM-Based Wireless Services Employing Radio over Optical Wireless Link. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 3(5). Recuperado a partir de <http://airccse.org/journal/jwmn/1011wmn14.pdf>
- Matiaë, D. (1998). Introduction to OFDM, II edition.
- Morles, V. (2002). Sobre la metodología como ciencia y el método científico: un espacio polémico. *Revista de Pedagogía*, 23(66), 121–146.

- Peled, A., & Ruiz, A. (1980). Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms. En *ICASSP '80. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* (Vol. 5, pp. 964–967). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <http://doi.org/10.1109/ICASSP.1980.1171076>
- Peña Cedillo, J. (2009). ¿Es el conocimiento científico, superior a los otros saberes humanos? *Utopía y Praxis Latinoamericana*, 14(46), 135–142.
- Prasad, R. (2004). *OFDM for Wireless Communications Systems*. Artech House universal personal communications series.
- Vikas, & Singh, S. (2013). Performance Evaluation of OFDM system with and without RS coding. *International Journal of Computer & Organization Trends*, 3(8). Recuperado a partir de <http://www.ijcotjournal.org/volume-3/issue-8/IJCOT-V3I8P105.pdf>



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **URUCHIMA PORTILLA, ANDERSON ANDRÉS** con C.C: # 0925302994 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis del desempeño de sistemas OFDM con diferentes modulaciones usando Simulink.** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 12 de Septiembre de 2016

f. _____

Nombre: URUCHIMA PORTILLA, ANDERSON ANDRÉS

C.C: 0925302994



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS OFDM CON DIFERENTES MODULACIONES USANDO SIMULINK		
AUTOR(ES)	URUCHIMA PORTILLA ANDERSON ANDRÉS		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. EDWIN FERNANDO PALACIOS MELÉNDEZ		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	12 de Septiembre de 2016	No. DE PÁGINAS:	62
ÁREAS TEMÁTICAS:	Sistemas de Comunicación, Transmisiones		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Desempeño, Simulink, OFDM, QPSK, 16-QAM, 64-QAM.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>La modulación multiportadora, particularmente la Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales (OFDM), ha sido aplicada con éxito en una gran variedad de tecnologías de comunicaciones digitales en los últimos años. OFDM ha sido elegida como el estándar para la capa física estándar de diversos sistemas importantes como IEEE 802.11 WLAN, 802.16 WMAN (Wimax), IEEE 802.22 WRAN, tecnologías celulares 3G y 4G, entre otras. Por tanto, sus fundamentos teóricos, algoritmos y técnicas de implementación siguen siendo temas de interés actual. En el presente trabajo se aborda la técnica de OFDM, comenzando desde sus orígenes. Se analizan sus fundamentos matemáticos, las principales características, parámetros usados y se resaltan sus ventajas. Además, se implementa en el programa de simulación Matlab/Simulink varios sistemas OFDM con diferentes modulaciones digitales como QPSK, 16-QAM y 64-QAM, y posteriormente se obtiene la tasa de bits erróneos (BER), en cada caso, para varios valores de relación señal a ruido.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono:	E-mail:	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-68366762		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			